

Title	コンクリート中の鉄筋腐食における劣化予測に関する研究(Dissertation_全文)
Author(s)	玉井, 譲
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2005-03-23
URL	http://dx.doi.org/10.14989/doctor.k11549
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

コンクリート中の鉄筋腐食における 劣化予測に関する研究

2005 年 3 月

玉井 讓

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	3
第 2 章 既往の研究	6
2.1 コンクリート中の鉄筋腐食過程	6
2.1.1 鉄筋の腐食メカニズム	6
2.1.2 コンクリート中の塩分量と鉄筋腐食発生の関係	7
2.1.3 コンクリート中の pH と鉄筋腐食発生の関係	8
2.2 塩害の劣化過程における支配要因	9
2.2.1 塩害	9
2.2.2 コンクリート中の塩分浸透評価	9
2.3 化学的侵食の劣化過程における支配要因	12
2.3.1 化学的侵食	12
2.3.2 コンクリート中における化学的侵食評価	13
2.3.3 化学的侵食による鉄筋腐食への影響	14
2.4 混和材および表面含浸剤に関する研究	15
2.4.1 混和材に関する研究	15
2.4.2 シランを用いた表面含浸剤に関する研究	18
2.5 高流動コンクリート	19
2.6 鉄筋腐食の非破壊検査手法	19
2.6.1 自然電位	19
2.6.2 分極抵抗	22
2.6.3 コンクリート抵抗	23
2.7 鉄筋コンクリート構造物の劣化予測に関する研究	24
第 3 章 コンクリートの塩分浸透性の評価	31
3.1 はじめに	31
3.2 種々のコンクリートにおける塩分浸透性	31
3.2.1 実験概要	31
3.2.2 混和材を用いたコンクリート中の塩分の存在形態	34

3.2.3	コンクリート中の塩分浸透性状	35
3.2.4	表面塩分量および拡散係数	38
3.3	促進試験における塩分浸透性状の評価	40
3.3.1	実験概要	40
3.3.2	電気泳動試験による実効拡散係数の評価	42
3.3.3	実効拡散係数と見かけの拡散係数の関係	44
3.4	本章のまとめ	46
第4章	鉄筋腐食の非破壊検査手法の評価	48
4.1	はじめに	48
4.2	混和材の使用が腐食モニタリング指標に与える影響	48
4.2.1	実験概要	48
4.2.2	自然電位と分極抵抗の関係	50
4.2.3	腐食面積率と自然電位の関係	51
4.2.4	腐食面積率と分極抵抗の関係	53
4.3	化学的侵食による腐食が腐食モニタリング指標に与える影響	54
4.3.1	実験概要	54
4.3.2	硫酸による侵食が鉄筋腐食に与える影響	57
4.3.3	硫酸水溶液中での鉄筋の電気化学的特性	58
4.3.4	自然電位	59
4.3.5	分極抵抗逆数値（腐食速度指標）	60
4.3.6	コンクリート比抵抗	61
4.3.7	鉄筋の腐食状況	61
4.3.8	中性化残りと腐食面積率の関係	62
4.3.9	電気化学的鉄筋腐食モニタリングと腐食開始および進展の関係	63
4.3.10	硫酸侵食における鉄筋の腐食生成物	64
4.4	本章のまとめ	65
第5章	分布を考慮に入れた塩分浸透性および鉄筋腐食性状の評価	67
5.1	はじめに	67
5.2	鉄筋腐食に関する各劣化指標の平面分布	67
5.2.1	実験概要	67
5.2.2	コンクリート中の全塩分量の分布	69

5.2.3	コンクリート中の鉄筋の腐食面積率の分布	71
5.2.4	鉄筋の自然電位および分極抵抗の分布	72
5.2.5	供試体中の塩分量の分布形状	74
5.2.6	供試体中の腐食面積率の分布形状	74
5.3	腐食面積率と塩分量の関係	77
5.3.1	各種混和材の影響	77
5.3.2	腐食発生限界量	78
5.4	腐食面積率とひび割れ発生確率の関係	79
5.5	各劣化指標の分布の相関関係	80
5.5.1	全塩分量の変動係数が与える影響	80
5.5.2	腐食面積率の変動係数が与える影響	81
5.5.3	分布を考慮に入れた維持管理対策	82
5.6	本章のまとめ	83
第 6 章	鉄筋の劣化予測に関する提案	85
6.1	はじめに	85
6.2	従来の劣化予測手法	85
6.2.1	耐久性照査と設計	85
6.2.2	点検と維持管理	87
6.3	確率理論に基づいた劣化予測手法	88
6.3.1	点検および劣化予測	88
6.3.2	腐食面積率と腐食確率	90
6.3.3	腐食確率および腐食面積率とひび割れ発生確率	94
6.3.4	ばらつきを考慮に入れた場合の劣化曲線	95
6.3.5	分布を考慮に入れた安全係数の算定	99
6.4	劣化予測におけるライフサイクルコスト	101
6.4.1	確率論的手法に基づいたライフサイクルコストの算出	101
6.4.2	ライフサイクルコストの試算	104
6.5	本章のまとめ	108
第 7 章	結論	110
謝 辞	116

第 1 章 序 論

1.1 本研究の背景と目的

土木構造物はインフラストラクチャーとして、われわれの生活において重要な役割を担っている。中でも鉄筋コンクリート構造物は多くの構造部材として用いられてきている。コンクリートと鋼材の弱点を補い合った鉄筋コンクリートは従来までは耐久的でメンテナンスフリーに近いと考えられてきた。しかし、近年になって塩害・中性化・アルカリ骨材反応および化学的侵食による劣化、あるいは構造物の性能が低下する例が多くみられるようになり、構造物の維持管理の必要性が高まっている¹⁾。また、維持管理を実際に行うためには、コンクリート構造物の現時点での状態を把握することが重要であり、さらに時間軸上における性能の評価および検討が不可欠となってきた。このような各種劣化機構によって生じる問題の中でコンクリート構造物の性能低下の観点から鉄筋腐食は最も重要なものである。

鉄筋腐食の評価技術としては、原因となるかぶりコンクリート部の劣化因子の浸透状態の把握および電気化学的モニタリング手法を用いた鉄筋の腐食状態の把握がある。

塩害環境下にある鉄筋コンクリート構造物においては、寿命評価や維持管理を行うにあたって、塩分の浸透性状を評価することがきわめて重要である。塩害の劣化過程からは、塩分が鉄筋表面において腐食発生限界量に達するまでの潜伏期間を予測することは、コンクリート構造物のシナリオを設定する上で不可欠なものであると考えられている。

鉄筋の腐食防止対策としてもっとも一般的な手法は、有害成分の鉄筋表面への到達を遅延させることである。遅延させる方法としては、コンクリートの水セメント比を小さくし密実にする、かぶりを増大させること、に加えて混和材の使用による浸透速度の抑制、あるいはコンクリート表面処理による有害成分の遮断を挙げることができる。しかし、すでに腐食が開始し進行している構造物に対してはこれらの対策は適切ではない。このような構造物に対しては、自然電位、分極抵抗およびコンクリート比抵抗による鉄筋の腐食状態を検知し、将来における進行の予測を行うことが必要となる。これらの手法を用いることにより、鉄筋の腐食状態を把握した上で電気化学的防食工法あるいは断面修復工法を施し、そ

れ以降は、劣化の進行を生じないようにする必要がある。

一方、化学的侵食に曝されている鉄筋コンクリート構造物においては、鉄筋腐食に関しては特に考慮する必要がないとされてきた。その理由としては、化学的侵食を受けるコンクリート構造物においては、硫酸イオンの浸透により表面部分のコンクリートから劣化が生じるので、鉄筋の腐食が生じる状態のときには、すでにかぶりコンクリートは消失している場合が多く見られるという理由からである²⁾。しかし、硫酸イオンは中性化深さよりもさらに内部にまで高濃度で達しているとも言われており³⁾、硫酸イオンも塩化物イオンと同様に不動態被膜を破壊する作用を有することから、鉄筋が露出する以前に、内部の鉄筋が硫酸イオン浸透による影響を受けている懸念がある。つまり塩害の場合と同様に硫酸イオン浸透深さに基づいた評価が必要であると考えられる。

各種構造物に対する耐久性設計および維持管理については、「性能規定」の概念が取り入れられつつある⁴⁾。しかし、不確定要素を取り扱うために、構造面のみでなく、耐久性の分野においても腐食範囲および状態の表現等において、確率理論に基づいた評価方法が求められている。そのため、鉄筋腐食などの劣化指標をその分布を考慮に入れて扱う必要性が生じている。さらに、ライフサイクルコストの検討を行う上で、腐食確率は不可欠な要素であり、不確定要素を考慮に入れた劣化予測^{5)、6)}およびライフサイクルコストの算定^{7)、8)}を行う研究についてもなされ始めている。したがって、これら劣化指標の分布性状を実験的に把握することはきわめて重要である。

しかし、塩害における混和材および表面処理の使用による浸透抑制効果については、まだ十分に検討されておらず⁹⁾、また化学的侵食における硫酸イオンの浸透に伴う鉄筋腐食の発生メカニズムおよびその進行過程についても十分に解明されていないのが現状である。さらに、混和材の使用あるいは硫酸侵食の場合の自然電位、分極抵抗およびコンクリート比抵抗への適用性に関してもあまり研究は行われていない。

そこで本研究では、シリカフューム、あるいは高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリート、およびシランにより表面含浸を行ったコンクリートに関して塩分の浸透抑制効果を検討し、これらのコンクリートにおける塩分浸透の予測手法の評価を行った。次いで、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート、あるいは化学的侵食により劣化したコンクリート中の鉄筋の腐食

状態を自然電位、分極抵抗およびコンクリート比抵抗により把握する電気化学的モニタリング手法の特徴および適用性に関して検討を行った。さらに、はり型供試体を作成し、同一の供試体内で多数のサンプルを採取し、塩分量、腐食モニタリング指標および鉄筋の腐食量の測定を行うことで、そのばらつきを種々のコンクリートについて評価し、分布の特徴について統計的な検討を行った。

以上のことから、コンクリートにおける塩分量および鉄筋腐食のばらつきを実験的に評価し、確率論的な腐食評価方法の確立を目的とした。さらに、これらを総合的に判断した上で、コンクリート構造物の寿命予測および劣化予測を行い、補修を含めた適切な維持管理手法を提案することを試みた。

1.2 本論文の構成

本論文は 7 章からなる。

第 1 章「序論」においては、本研究の背景と目的を述べた。

第 2 章「既往の研究」においては、塩害による鉄筋腐食メカニズム、塩分の浸透性状評価、化学的侵食による鉄筋の劣化メカニズム、塩分浸透抑制対策としての混和材および表面処理材の位置づけ、および鉄筋腐食に対する各非破壊検査手法の特徴について既往の研究および現状における問題点に関して述べた。

第 3 章「コンクリートの塩分浸透性の評価」においては、シリカフューム、高炉スラグ微粉末の混和、あるいはシランによる表面処理がコンクリート中の塩分浸透性に与える影響について検討を行い、塩分の浸透性に関する予測および評価を行った。

第 4 章「鉄筋腐食の非破壊検査手法の評価」においては、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート、あるいは化学的侵食されたコンクリート中の鉄筋腐食に対して非破壊的な電気化学的モニタリング手法の適用性および評価手法について検討を行った。

第 5 章「分布を考慮に入れた塩分浸透性および鉄筋腐食性状の評価」においては、シリカフューム、高炉スラグ微粉末およびスランプが塩分浸透量および鉄筋腐食量の分布に与える影響について検討を行い、コンクリート中における各劣化要因の分布についての評価を行った。

第 6 章「鉄筋の劣化予測に関する提案」においては、コンクリート中の鉄筋の腐食性状の分布を表す指標として、鉄筋の腐食確率を定義し、塩分浸透量および

かぶりの分布が鉄筋の腐食確率に与える影響について検討を行なった。また、腐食確率に基づき耐久性に関するライフサイクルコストの評価を行い、鉄筋腐食に関して分布を考慮に入れた劣化予測の提案を行った。

第7章「結論」においては、各章で得られた結果から、コンクリート中における鉄筋腐食の劣化予測に関しての提案を行い、各章で得られた結果を総括するとともに、今後の課題を指摘し、結論とした。

以上の本論文の構成をフローチャートとして図 1.1 に示す。

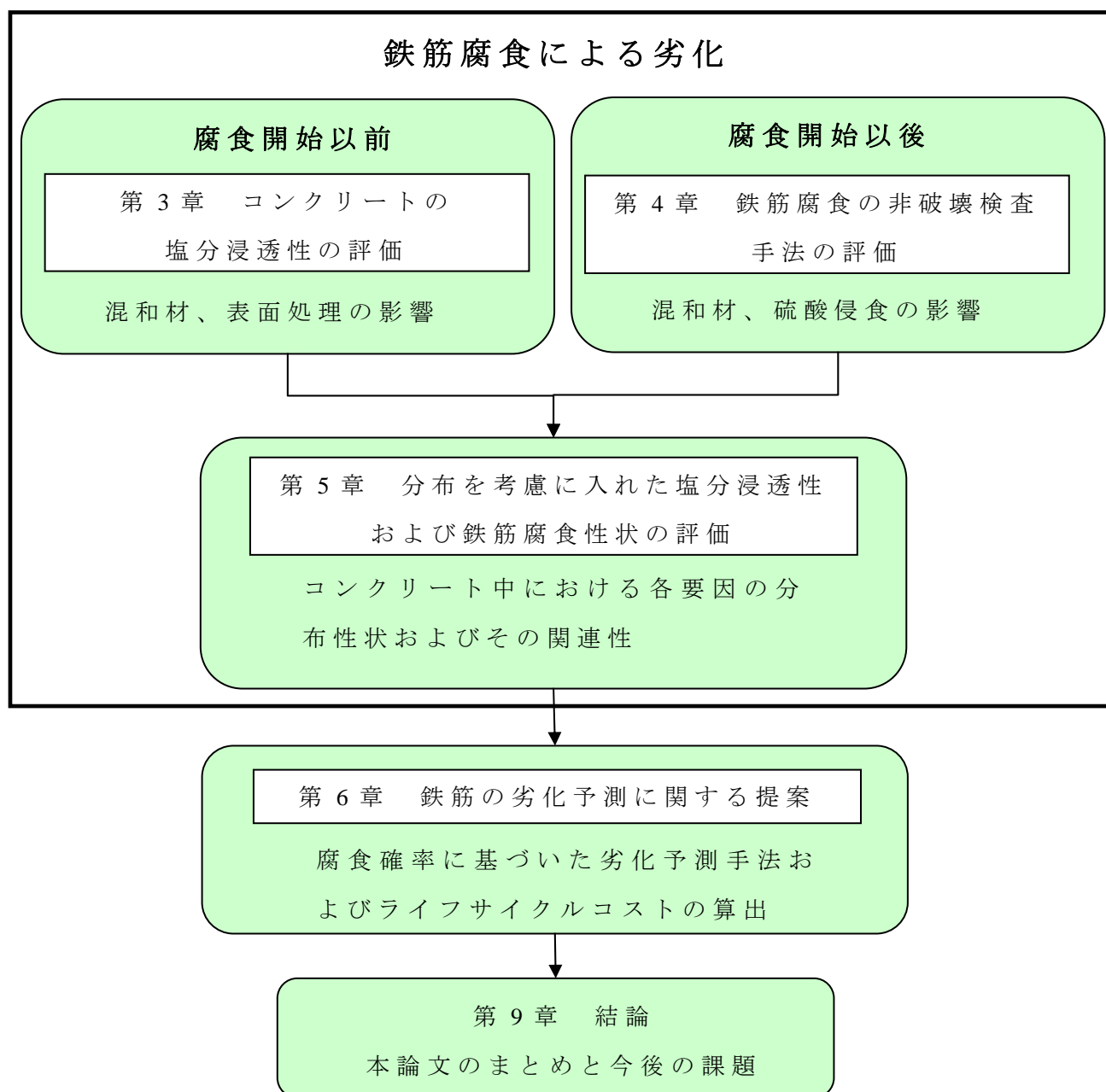


図 1.1 本論文の構成

参考文献

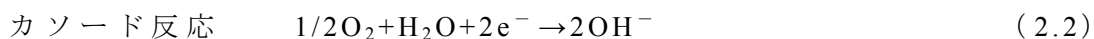
- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書、1998
- 2) 土木学会：コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究、コンクリート技術シリーズ 53、2003
- 3) 日本下水道事業団編著：下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術および防食技術指針・同マニュアル、2002
- 4) 湯山茂徳：構造物の性能規定設計・管理における検査技術の動向、非破壊検査、Vol.21、No.1、pp3-7、2002
- 5) 岸雅之ほか：鉄筋腐食劣化を考慮した RC 部材の性能評価の評点化手法、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.1171-1176、2001
- 6) 上東泰ほか：コンクリート構造物の外観変状状態の予測に関する検討、第 58 回年次講演会講演概要集、No.5、pp.169-170、2003
- 7) Tarama Williams.et.al: Reliability-Based Nondestructive Testing and Repair of Concrete Seawall, ACI Structural Journal,pp.166-174,2000
- 8) S.Engelund et al: Evaluation of Repair and Maintenance Strategies for Concrete Coastal Bridges on a Probabilistic Basis, ACI Material Journal, pp160-166, 1999
- 9) 日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック、2004

第 2 章 既往の研究

2.1 コンクリート中の鉄筋腐食過程

2.1.1 鉄筋の腐食メカニズム

一般にコンクリートの細孔溶液は水酸化カルシウムで飽和しており、その pH は約 12～13 である。このような強いアルカリ性環境のもとでは鉄筋表面に不動態被膜が形成されており、鉄筋は腐食から保護されている。しかし、中性化、あるいはある種の有害成分の混入により、鉄筋が活性態となると腐食しやすくなる。鉄筋の不動態被膜を破壊する有害成分には、ハロゲンイオン (Cl^- 、 Br^- 、 I^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-})、または硫化物 (S^{2-}) などの陰イオンが挙げられる¹⁾。この中で塩化物イオンは不動態被膜の破壊作用が強く、しかもコンクリート中に混入あるいは飛来する機会が多いので、コンクリート中の鉄筋の腐食に対する最も有害なイオンである。以上のような作用によって不動態被膜が破壊された場合、次式 (2.1)、(2.2) で表される電気化学的反応によって鉄筋は容易に酸化・腐食を引き起こす。



コンクリート中の鉄筋の腐食では、鉄イオンが溶出するとともに電子を発生するアノード反応と、その電子が溶存酸素を還元するために消費されるカソード反応が鉄筋表面で生じ、腐食電池を形成する。その結果、溶出した鉄イオンは複雑な反応を経て水和イオンや錆になる。この 2 種類の反応式 (2.1)、(2.2) を 1 つにまとめると式 (2.3) のように表される (図 2.1 参照²⁾)。

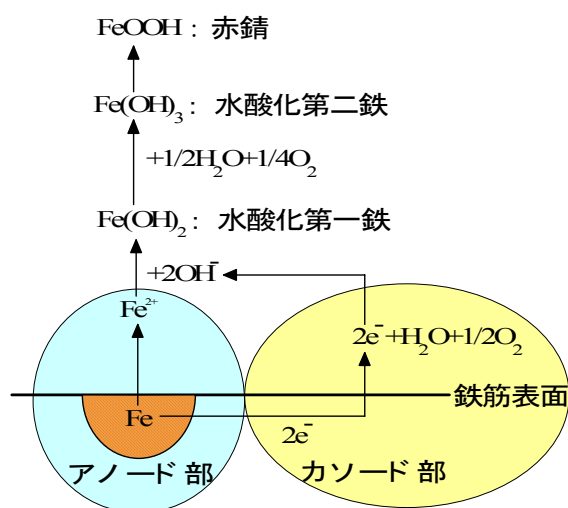


図 2.1 鉄筋の腐食反応機構



鉄の錆層（水酸化第二鉄）は多孔質であるため、発錆後も腐食を抑制する効果が小さく腐食は進行する。また、一般的に腐食生成物は鉄より約 2.5 倍の体積を有するため、その膨張圧がコンクリートのひび割れおよび剥離を引き起こし、ひび割れがさらなる腐食の進行を促す結果となる。

2.1.2 コンクリート中の塩分量と鉄筋腐食発生の関係

コンクリート中に浸透した塩分の一部はセメント中の成分と化学的に結合し、腐食に影響を与えないフリーデル氏塩を形成しており、コンクリート中の鉄筋の腐食発生に関しては限界値があるとされている。普通ポルトランドセメントにおいては 0.4%までの塩化物イオンが固定されると報告されている。コンクリート標準示方書〔施工編〕³⁾では、腐食発生の限界値を 1.2kg/m^3 と設定しているが、実際にはかぶり、水セメント比、温度および環境条件により様々な結果が得られている。土木研究所の実験結果によると、 $W/C=70\%$ での限界量は 0.25kg/m^3 であり、 $W/C=55\%$ での限界量は 0.50kg/m^3 であると報告されている⁴⁾。また、通常黒皮のある鉄筋についてはセメント百分率で 0.2%（約 0.8kg/m^3 ）であるとの報告もある⁵⁾。さらに、モルタル中の鉄筋のアノード分極曲線から不動態被膜の有無を判断した大即らの研究^{6)、7)}によると、塩分量が 2.25kg/m^3 以下では 80%以上の場合で不動態を有するのに対し、それ以上になると不動態が存在する割合は急激に低下し、50%以下になると報告されている。この他、Browneらの研究では、限界値として設定せず、塩分量ごとに表 2.1 のように腐食リスクを示したものもある⁸⁾。

表 2.1 各塩分量の腐食危険度

塩分量 (セメント重量%)	塩分量 (kg/m^3)	腐食危険度
> 2.0	> 1.6	Certain
1.0-2.0	0.8-1.6	Probable
0.4-1.0	0.03-0.8	Possible
< 0.4	< 0.03	Negligible

2.1.3 コンクリート中の pH と鉄筋腐食発生の関係

鉄の腐食を例にとると、図 2.2⁹⁾ に示すように、 $\text{pH} \leq 4$ （酸性域）では鉄は溶解し腐食速度は著しく大きい。 $\text{pH} > 10$ では不動態化が強化され腐食速度は著しく小さくなる。よってコンクリート中の鉄筋は錆びにくい。 $\text{pH} 4 \sim 10$ では腐食速度はほぼ一定である。これはカソード表面へ拡散してくる酸素の量によって律速されているためである。 $\text{pH} \leq 4$ では、鉄表面の酸化物が溶解するために水溶液と直接に接することで腐食速度は大きくなる。弱酸の場合は、 $\text{pH} 5 \sim 6$ でも水素発生を伴って腐食速度は増大する。このように pH は、金属の耐食性に大きく影響することが分かる。

また縦軸に電位 (E)、横軸に pH をとって、水中における金属の安定状態を示したものに電位 - pH 図、いわゆるプルーベ (M.Pourbaix) の電位 - pH 図を図 2.3 に示す。a 破線は水素発生の上限を、b 破線は酸素発生の下限を示す。いわゆる腐食は水の安定領域 (a と b で囲まれた領域) で起こる。①③⑨以下の電位では腐食せず不変態として安定である。また④③⑧⑦に囲まれた領域および⑤⑦と破線 b に囲まれた領域はそれぞれ Fe_3O_4 および Fe_2O_3 の生成により不働態化され、鉄の腐食は抑制される。①④⑤⑥に囲まれた領域においては、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} が安定であり鉄が溶出する（腐食される）。しかし、図 2.3 は腐食を引き起こすイオンが存在しない場合であり、 Cl^- あるいは SO_4^{2-} が存在する場合においては異なったものとなる。

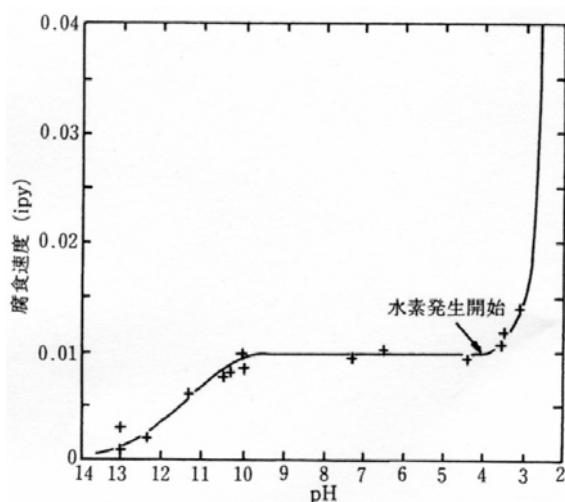


図 2.2 鉄の腐食に与える pH の影響

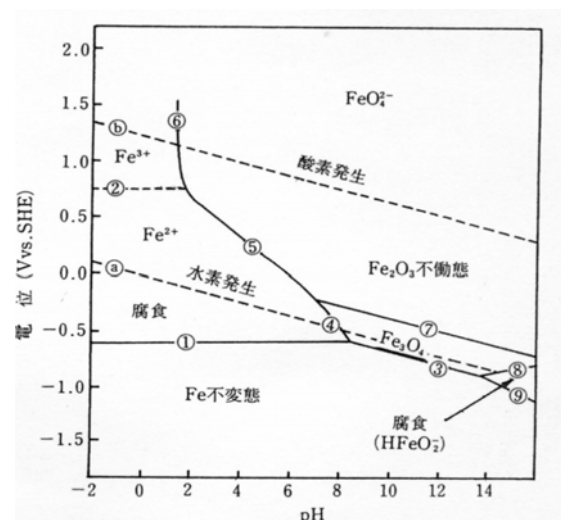


図 2.3 鉄の電位 - pH 図

2.2 塩害の劣化過程における支配要因

2.2.1 塩害

塩害とは、コンクリート中の鉄筋の不動態被膜が塩化物イオンによって破壊され、鉄筋が腐食し、コンクリート構造物としての性能を低下させ機能に害を与える現象のことである。一般に、コンクリート構造物の塩害による劣化過程は潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4段階に区分することができる。それぞれの段階の特徴は以下のようなものである(図2.4 参照¹⁰⁾)。

I .潜伏期：鋼材のかぶり位置における塩分濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間であり、塩分の拡散および初期含有塩分濃度に支配される。

II .進展期：鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間であり、鋼材の腐食速度に支配される。

III .加速期：腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間であり、ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度に支配される。

IV .劣化期：腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間であり、加速期と同様にひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度に支配される。

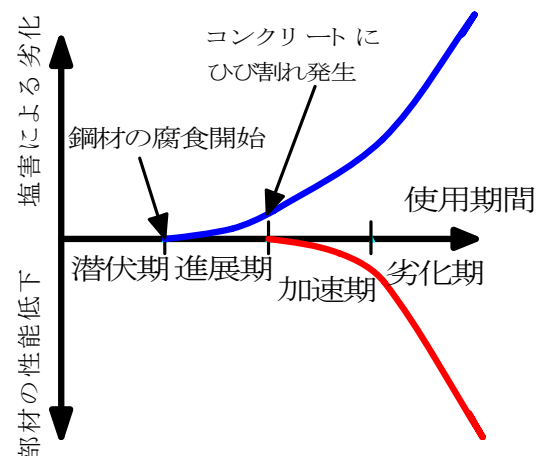


図 2.4 塩害における劣化過程

2.2.2 コンクリート中の塩分浸透評価

コンクリート中の塩分の移動現象に関する一般的な解析においては、コンクリート中の塩分は塩化物イオンとして細孔などに存在する未水和水中を濃度拡散により移動するという考え方を基本としている。しかし移動に与える要因としては、他に塩分の固定、イオンの相互作用、電気的作用、およびコンクリート細孔溶液中の水分移動が複雑に影響している。そのため、コンクリート中の塩分浸透に対

しては、これらの各要因を含めた見掛けの拡散係数として扱われている。したがって、コンクリート中の塩分の移動には、コンクリートの細孔構造や乾湿繰返しによる水分の移動が大きく関係するものと考えられる。また、コンクリートの水セメント比が大きい場合や養生が十分ではない場合には、コンクリートの組織構造は緻密ではなくなり塩分は移動しやすくなる。これらはセメントの種類や用いる混和材料の種類にも影響を受ける。

塩分の拡散浸透を表現するのに広く一般に用いられているのが、Fick の第 2 法則に基づいて、拡散係数を一定とした拡散方程式 (2.4) である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

ここに、C：塩分量 (kg/m³)

t：供用期間 (sec)

x：コンクリート表面からの距離 (m)

D：見かけの拡散係数 (m²/sec)

式(2.4)を初期条件 C(x,0)=0

C(0,t)=C₀ (一定)

のもとで解くと式 (2.5) のようになる。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \quad (2.5)$$

ここに、C₀：表面塩分量

erf：誤差関数

一般には、式 (2.5) を用いることによってコンクリート中の塩分浸透予測がされているが、より詳細にかつ正確に塩分浸透性を予測するために、Fick の第 2 法則を基本とする他の解析的な予測式が提案されている。例えば、表面塩分量が時間 t の平方根に比例する (C₀(t)=k √ t) という報告¹¹⁾ があるが、その場合の式 (2.4) の解は式 (2.6) のようになる。また、より複雑な境界条件の場合においては、有限要素法などの数値計算による方法も用いられている。

$$C(x,t) = k\sqrt{t} \left\{ \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right) - \left(\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \right\} \quad (2.6)$$

塩分浸透を評価する場合においては、通常表面塩分量および拡散係数が必要である。表面塩分量は拡散方程式を解くための境界条件として必要であり、一般的には一定として計算されている。さらに、様々な塩害環境条件における表面塩分量の設定値についてはコンクリート標準示方書〔施工編〕で示されている（表 2.2 参照³⁾）。しかし、海洋環境の飛沫帯のような乾湿繰返しの激しい環境では、表層部分の塩分濃度が経時的に高くなるという現象が知られている。その予測式については多くの研究で明らかになっており、丸屋らの研究では $C_0(t) = k \sqrt{t}$ 、金谷らの研究¹²⁾ では $C_0(t) = a(1 - e^{-bt})$ 、竹田らの研究¹³⁾ では $C_0(t) = b(1 - e^{-\beta t})$ に基づいて変化すると報告されている。

表 2.2 表面における塩分量 (kg/m²)

飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

拡散係数も表面塩分量と同様に、一般的には一定値であると仮定されている。塩分の浸透予測を行うにあたって拡散係数を決定することが必要であり、コンクリート標準示方書〔施工編〕³⁾ では以下のような式 (2.7)、(2.8) が提案されている。

普通ポルトランドセメントを使用した場合

$$\log D = 3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2.7)$$

高炉セメントかシリカフュームを使用した場合

$$\log D = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (2.8)$$

拡散係数の経時変化については、供用期間とともに小さくなるということが既往の研究において報告されており¹⁴⁾、これは細孔構造の変化が影響していると考えられている¹⁴⁾。しかし、水セメント比による拡散係数の推定に関しては、水セメント比が 0.4 よりも小さいときについては比較的信頼できるが、ばらつきが大きいために水セメント比ではなく圧縮強度を指標とするべきであるとの報告もされている¹⁵⁾。さらに、横関らが行った海洋暴露試験と電気泳動試験の結果¹⁶⁾ から

拡散係数を式（2.9）および（2.10）で求める方法を提案している。

$$D_c = 10^{\{(C-m)/n\}} \quad (2.9)$$

$$C = 8\beta \cdot a \cdot e^{b \cdot f^7 c} \quad (2.10)$$

ここで、m、n：環境区分と塩分の浸透方向にかかわる係数

β ：年平均気温

a、b：セメントの種類に関わる係数

f、c：圧縮強度

また、表面塩分量および拡散係数は測定点ごとにばらつくものであるが、これらの特性値を設定する場合において、その特性値が平均値に 1σ 加えた値以下の範囲に入っていればばらつきを考慮に入れても 84% の確率で安全側であるとの報告もされている¹⁷⁾。

2.3 化学的侵食の劣化過程における支配要因

2.3.1 化学的侵食

化学的侵食とは、コンクリート保護層、コンクリート、鉄筋の順に硫酸などの化学的な作用によって劣化・消失させ、コンクリート構造物としてその機能に害を与える現象のことである。一般に、コンクリート構造物の化学的侵食による劣化過程は潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4段階に区分することができる。それぞれの段階の特徴は以下のようなものである（図2.5参照¹⁸⁾）。

I .潜伏期：コンクリートの変質が生じるまでの期間であり、コンクリート保護層中への劣化因子の侵食速度に支配される。

II .進展期：コンクリートの変質が鋼材位置に達するまでの期間であり、コンクリート中への劣化因子の侵食速度に支配される。

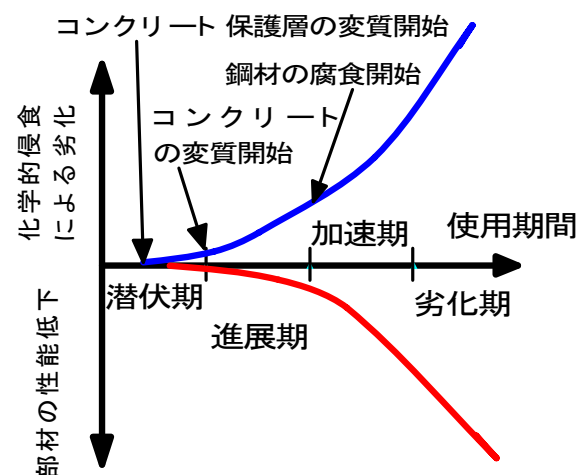


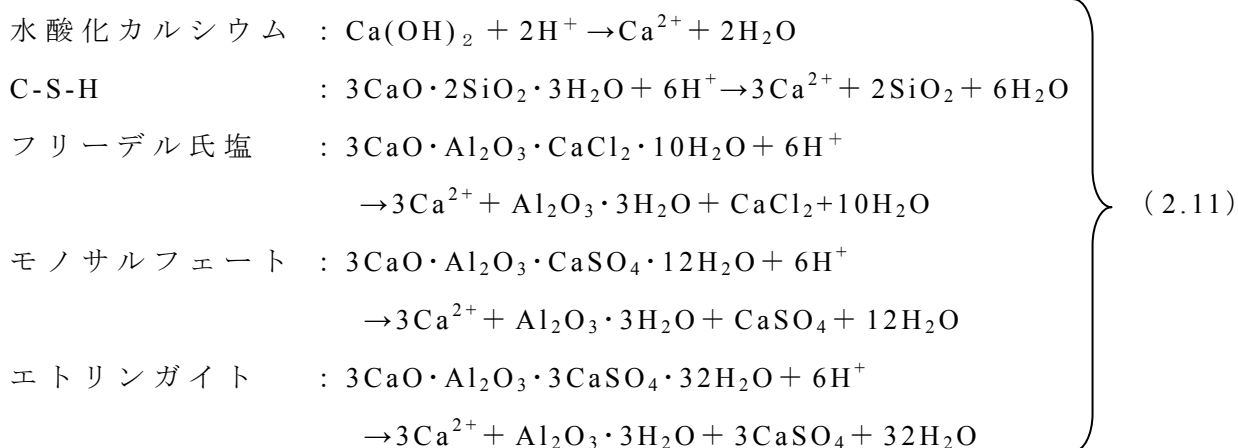
図 2.5 化学的侵食における劣化過程

Ⅲ.加速期：鋼材腐食が進行する期間であり、鋼材の腐食速度に支配される。

Ⅳ.劣化期：コンクリートの断面欠損・鋼材の断面減少などにより耐荷力の低下が顕著な期間であり、加速期と同様に鋼材の腐食速度に支配される。

2.3.2 コンクリートに対する化学的侵食評価

酸によるコンクリートの化学的侵食は、酸とセメント水和物が反応することにより、水和生成物が分解されて溶解性物質に変化し、溶出またはゲル化して浸出することで組織が多孔化および分解するものである。セメント水和物と酸の化学反応を示すと、一般的には式（2.11）のようになる。



上記のような化学反応を経て劣化が進行していく化学的侵食の劣化予測を行うためには、変質部分と劣化因子の浸透深さは異なっている¹⁹⁾とされているため、変質部分と劣化因子とは区別して考える必要がある。以下での劣化予測は、コンクリートへの劣化因子の浸透深さに対して行う場合のものである。

① シミュレーション試験の利用

化学的侵食は、コンクリート保護層またはコンクリートの表面から徐々に進行していく場合が多い。しかし、これまでのところ化学的侵食の劣化予測に関する体系的な方法は提案されていない。また、劣化因子が高濃度に存在する場合には、化学的侵食による生成物が急激に生成されて細孔内を充填するために、劣化因子が低濃度の場合よりも化学的侵食の進行が遅延される場合もある。したがって、構造物のおかれた環境を把握しながら、構造物と接触が予想される劣化因子とその濃度を用いたシミュレーション試験を行い、浸透深さの予測を行うことが望ま

しい。

② \sqrt{t} 則²⁰⁾ の利用

酸性劣化では、pH が低い場合（pH = 1～3 程度）には、劣化因子の浸透深さは時間の平方根に比例する場合が多く、式（2.12）のように表される。

$$y = b \sqrt{t} \quad (2.12)$$

ここに、y：劣化因子の浸透深さ（mm）

t：化学的侵食をもたらす物質に曝される期間（年）

b：劣化因子の侵食速度係数（mm／ $\sqrt{\text{年}}$ ）

化学的侵食の劣化因子の浸透は塩分の浸透とは異なり、コンクリート中への浸透に加えてセメント水和物の溶出を伴うことから、実験的な予測式が用いられているのが現状である。また、脆弱部の除去の有無によっても侵食速度は異なり、脆弱部を除去した場合の劣化因子の浸透深さは時間に比例するとの報告もある。劣化因子の浸透深さの予測については、断面減少と複合的に検討を行う必要がある。

2.3.3 化学的侵食による鉄筋腐食への影響

硫酸により腐食しているコンクリート構造物の深さ方向への硫酸イオンの侵入と pH 分布の関係を図 2.6²¹⁾ に示す。図に示すように、硫酸による化学的侵食を受けるコンクリー

トの腐食断面では、中性化領域より深い部分に硫酸イオンが侵入していると考えられ、その程度は、コンクリートの状態やコンクリート腐食環境により異なり、概ね 1～2cm 程度であり、内部の鉄筋が硫酸イオン浸透によ

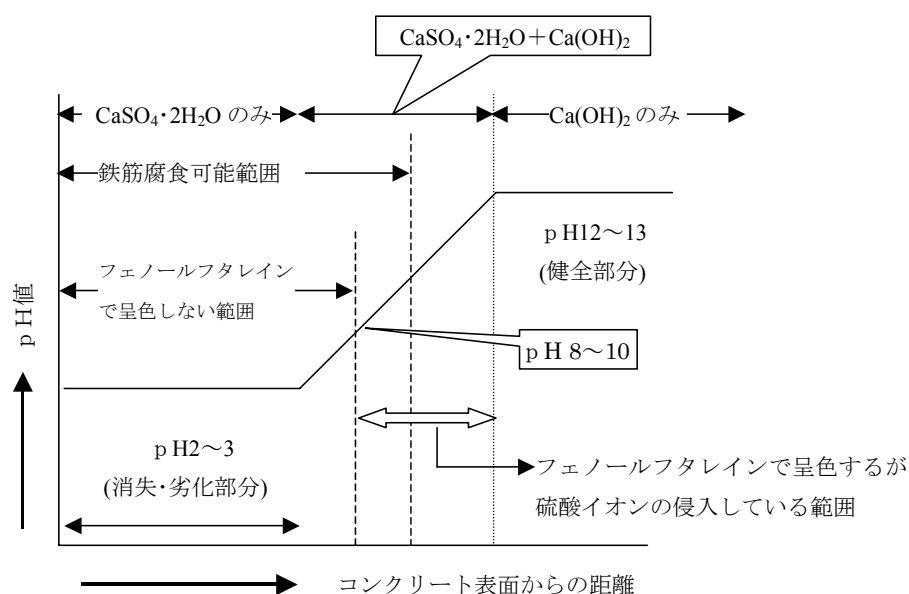


図 2.6 硫酸イオンによるコンクリート腐食の概念図

る影響を受けている可能性がある。

化学的侵食の進行予測は、コンクリート保護層およびコンクリートの品質ならびに構造物が供用される環境条件の影響を適切に考慮して行われなければならない。表 2.3 に化学的侵食による鋼材腐食の進行予測を示す。しかし、劣化因子の浸透深さを簡易に測定することが困難なことから、腐食の開始時期が中性化残りで判定されていること、さらに腐食開始後の進行予測についても鉄筋をはつりだすことによる点検結果から予測を行っているのが現状である。また、シミュレーション試験に利用についても、結果を得るためには長期間および多くの実験結果を要するといった問題点が存在するのが現状である。このような問題点があることから、化学的侵食に伴う鉄筋腐食のメカニズム、およびその非破壊的な検査手法の確立が望まれる。

表2.3 化学的侵食による鋼材腐食の進行予測

時期	方法
鋼材の腐食開始時期	中性化残りで判定する
鋼材の腐食進行予測	点検結果で得られた腐食量に基づく方法 シミュレーション試験の利用

2.4 混和材および表面含浸剤に関する研究

2.4.1 混和材に関する研究

近年、資源の再利用および有効利用を目的として様々な種類の混和材が利用されつつあり、その塩分浸透性状や鉄筋腐食性状に関する研究も多く行われている。

① 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は高炉において銑鉄を製造するときに副産物として発生する高炉スラグを水により急冷し、乾燥・粉末状にしたガラス質の粉体である。粒子径は粉砕の程度によって $5\sim 10\mu\text{m}$ （比表面積は $4000\sim 8000\text{cm}^2/\text{g}$ ）のものが存在する。製造された高炉スラグ微粉末の一部はポルトランドセメントと少量のせっこうとともにプレミックスしたものが高炉セメントとして製品化されている。高炉スラグ微粉末は、 NaOH 、 KOH などのアルカリ刺激剤と呼ばれる少量の物質が存在すると硬化する潜在水硬性を有しており、コンクリートの温度上昇の抑制、コンクリート組織の緻密化による水密性・塩分遮蔽性の向上、海水や酸・硫酸塩に対する化学抵抗性の向上、アルカリシリカ反応の抑制などに効果があることが

認められている^{22)、23)}。特に塩分遮蔽性に関しては、図 2.7 に示すように高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは 20 年海水中に浸せきした場合の塩分量が表面から 3～6cm では普通コンクリートの半分以下であり、同一水セメント比においても塩分の浸透抑制効果があるとされている²⁴⁾。高炉スラグ微粉末がコンクリート中に浸透した塩化物イオンと反応し、フリーデル氏塩を生成することから、鉄筋位置に同量の塩分が浸透した場合においても腐食面積率は小さいとの報告もある²⁵⁾。また、コンクリート中のアルカリ分を消費して硬化するために pH が低下するという問題点に関しては、同一水セメント比の場合では、普通ポルトランドセメントに比べて高炉スラグ微粉末を混和したセメントの方が、腐食面積率は小さいという結果が得られている²⁶⁾。しかし、電気化学的な手法による腐食モニタリングについては、腐食していないにもかかわらず自然電位が卑な傾向になるという点も指摘^{27)、28)}されている。一方、フレッシュ性状としては、無混入のものに比べ単位水量を 2～6% 低減できるうえにワーカビリティおよび流動性の向上を得られることから、比表面積の大きなものでは高流動コンクリート用結合材としても用いられている。高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの塩分浸透性および鉄筋腐食に関する研究²⁹⁾では、同一の強度を持つ普通コンクリートよりも塩分浸透および鉄筋腐食は抑制されているという結果が得られていた。そこで、流動性の向上により、打設時におけるコンクリートの不均一性を低減でき、マクロセル的腐食電池の形成を低減できる可能性もあると考えられる。

② シリカフューム

シリカフュームは、フェロシリコン、金属シリコンを生産する際に発生する排ガスから捕集される超微粒子で、非晶質の SiO_2 を主成分とするものの総称である。

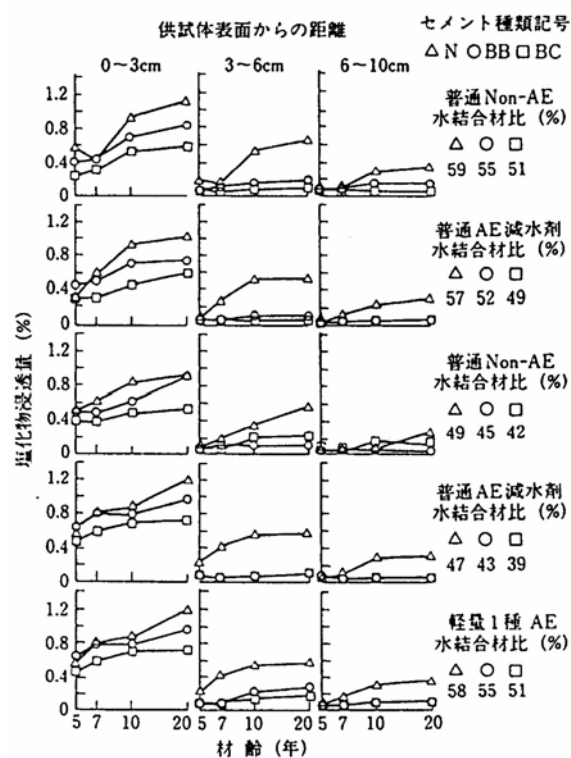


図 2.7 海水中に 20 年間浸漬したコンクリートの NaCl 測定結果

形状はきれいな球状(写真 2.1)であり、粒子径が $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、比表面積 $10 \sim 25 \text{m}^2/\text{g}$ 程度の超微粒子である。このシリカフュームをコンクリートに混和して得られる効果としては、シリカフュームは図 2.8 に示すようにセメント粒子表面に凝集しており、超微粒子であるシリカフュームがより大きい粒子の間隙を充填するマイクロフィラー効果、および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応し珪酸カルシウム水和物 (C-S-H) を生成し強度を発現するポゾラン反応が挙げられる。シリカフュームを混和したコンクリートのフレッシュ性状としては、低水結合材比とした場合の高強度コンクリートの流動性、特に粘性の向上に有効である。シリカフュームを用いたコンクリートの耐久性に関しては、まだ十分な研究がなされてはいないものの総じて向上すると考えられている。特に水密性においては、シリカフュームのポゾラン反応およびマイクロフィラー効果によって、強固で緻密な組織となるため有効である。シリカフュームを用いたコンクリートの塩分浸透性についての研究³⁰⁾では、暴露 10 年でもコンクリート内部への塩分の浸透は大幅に抑制されており、シリカフュームによる抑制効果が認められている。シリカフュームを用いたコンクリートの長期海洋環境における研究によると³¹⁾、シリカフュームの混和率が大きくなるほどに塩分浸透深さは小さくなっており、鉄筋の腐食面積率も小さくなっている。特に、水セメント比を 40~60% の間においては、50% のときにもっとも影響が顕著になっている。また、中性化と塩害の複合劣化を受けたコンクリート中の鉄筋腐食に関しても抑制効果があるとの報告³²⁾もある。さらに、水密性および流動性の向上により、高炉スラグ微粉末で述べたようにばらつきを低減できることで、マクロセル的腐食電池の形成を低減できる可能性もあると考えられる。



写真 2.1 シリカフュームの透過電子顕微鏡写真



図 2.8 シリカフュームの凝集モデル

③その他の混和材

その他の混和材としては、ポゾラン反応を有するフライアッシュや硬化過程におけるコンクリートの温度上昇および硬化後の過度な強度発現を抑制する目的で使用されることが多い石灰石微粉末などが挙げられる。これらを用いる場合の鉄筋腐食性状は、組織が緻密になるなどの特性を有しており、腐食に対しても抑制効果があるとされている。

2.4.2 シランを用いた表面含浸剤に関する研究

コンクリート中の水分制御を行うことを目的として、多くの表面処理材料・工法がある。コンクリートの表面処理工法は水分制御法によって大きく次のように分類される。外部からの水分の侵入も許さないが、内部からの水分の逸散も許さない遮水系と外部からの水分の侵入をある程度許すが、内部からの水分の逸散能力に優れた撥水系の2種類である。

コンクリート中に水分が存在したままで遮水系の補修を行った場合、すでにコンクリート中に含まれていた水分、あるいは未補修部からの水分の侵入によって、再びアルカリ骨材膨張による劣化や、鉄筋が再腐食するなど、場合によっては無処理の場合よりも変状が大きくなることすらある³³⁾。このような再変状を防止するために、コンクリート中の水分を逸散させることを期待されているのが撥水系の表面処理工法であり、内部からの水分逸散能力に優れた水分制御の観点から、シランを用いた撥水系表面含浸が注目されている^{34)、35)}。

シランはコンクリートの細孔に浸透し、細孔構造に存在する水分と式(2.13)のように加水分解反応を起こしシラノールを形成する。



シラノールはコンクリート中のシリケート構造の水酸基と反応して結合すると同時に、互いに網目構造を形成することで撥水性が得られる。シランには分子構造および分子量の異なった種類があり、シランの疎水基が大きいものほど遮水性や遮塩性が向上すると報告されている³⁶⁾。一方、コンクリートの性状がシランの浸透性状に与える影響に関する研究³⁷⁾では、水セメント比が小さいほど浸透深さは小さくなるという報告であった。しかし、他の研究では、海洋構造物において用

いられるような低水セメント比のコンクリートにおいても遮水効果を発揮するとされている³⁸⁾。

シランを用いた表面処理による塩分浸透抑制効果に関しては、他の表面被覆材などに比べて塩分の浸透量は少ないと報告されている例もあるが、長期における耐久性について問題点があると指摘されている³⁹⁾。また、シランの鉄筋腐食抑制効果については、初期塩分が存在している場合にはシランによる抑制効果は認められないという報告もある⁴⁰⁾。

2.5 高流動コンクリート

高流動コンクリートとは「フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めたコンクリート」と定義され⁴¹⁾、狭義では「締固め作業を行わなくとも、自重のみで型枠の隅々までゆきわたることを目指した」自己充填性を有するコンクリートのことをいう。ここでいう流動性とは、「重力や外力による流動のしやすさを表すフレッシュコンクリートの性質」と定義されている⁴¹⁾。

一般に高流動コンクリートは低水セメント比であるため、物質透過性が小さい点で硬化後の耐久性は良好であると考えられている。さらに打設時における締固め不良およびばらつきを低減でき均質であるため、鉄筋のマクロセル腐食を抑制できる点でも、優れたコンクリートであると考えられる。その結果、耐久性においても局所的な劣化が生じにくいとされているが、実証されていないのが現状である。

しかし、高流動コンクリートについてフレッシュ時の性状および施工に関してはよく知られているが、硬化後の性状および耐久性に関する長期的な研究は、あまりなされていないのが現状である。

2.6 鉄筋腐食の非破壊検査手法

2.6.1 自然電位

自然電位法はコンクリート表面で測定された鉄筋の自然電位を測定することによって鉄筋腐食を診断しようとするもので、その原理は次のように説明されている。健全なコンクリート中では強アルカリ性のため、鉄筋は不動態化しており、その電位は飽和塩化銀電極（Ag/AgCl）基準で -90mV より貴な値を示すが、塩化物の侵入や中性化によって図 2.3 に示す不動態被膜が破壊され、鉄筋が腐食領域になると、その電位は卑な方向へ変化する。すなわち自然電位を測定することに

より鉄筋が腐食している状況にあるかどうかを判断することができ、鉄筋の電位は鉄筋の腐食箇所の検出や腐食状態の診断に有効であると考えられる。

自然電位による鉄筋の腐食性の判定は、電位値および電位分布により行われている。自然電位値からコンクリート構造物中の鉄筋の腐食状態を診断する評価基準としては、ASTM C 876 規格⁴²⁾が広く用いられている。これは、コンクリート表面における鉄筋の自然電位 E と鉄筋腐食性の関係を表 2.4 のように定義している（飽和塩化銀電極基準）。また、イギリスでは British Standard (BS 7361) として基準が制定されている⁴³⁾（表 2.5 参照）。わが国では、1983 年に日本コンクリート工学協会により「海洋コンクリート構造物の防食指針（案）－改訂版－」資料 5 に「コンクリート中の鋼材の電位測定方法の一試案」として自然電位の測定基準案が示されている⁴⁴⁾。

表2.4 自然電位 E と鉄筋腐食性の関係

自然電位 E (vs AgCl)	鉄筋腐食性
$-90\text{mV} < E$	非腐食領域 (90%以上の確率で腐食は生じていない)
$-240\text{mV} \leq E \leq -90\text{mV}$	不確定領域
$E < -240\text{mV}$	非腐食領域 (90%以上の確率で腐食は生じている)

表2.5 自然電位 E と鉄筋腐食性の関係

自然電位 E (vs CuSO_4)	鉄筋腐食の可能性
$-200\text{mV} < E$	5%
$-350\text{mV} \leq E \leq -200\text{mV}$	50%
$E < -350\text{mV}$	95%

コンクリート表面で測定される鋼材の自然電位は、かぶり部分のコンクリートの品質・性状に起因して生じる電位分が加算されるため、実測値による判定結果と実際の腐食状態が一致しないことがある。この電位変動分は、コンクリート表層の含水率が低い場合に生じる電気抵抗による電位降下や中性化、塩分浸透から生じる液間電位差などにより生じるため、補正の必要がある。その補正量は、電位変動に大きく影響する含水率と炭酸化による中性化深さおよび塩分量に依存し、これらの値を用いて、以下の式 (2.14) ～ (2.16) から、算出できるとしている⁴⁵⁾。

$$Z = Z_1 + Z_2 \quad (2.14)$$

ここに、 Z ：電位変動分、 Z_1 ：含水率による電位変動分、 Z_2 ：中性化の進行に伴う電位変動分

① 塩分を含まない場合 (2.15)

$$\begin{cases} Z_1 = -25 \times X + 180 \\ Z_2 = 8 \times Y \end{cases}$$

② 塩分を 3kg/m^3 含む場合 (2.16)

$$\begin{cases} Z_1 = -20 \times X + 150 \\ Z_2 = 4 \times Y \end{cases}$$

ここに、 Z_1 、 Z_2 ：電位変動分 (mV)、 X ：含水率 (%)、 Y ：中性化深さ (mm) したがって、補正電位は以下の式 (2.17) となる。

$$(\text{補正自然電位}) = (\text{測定自然電位}) - (\text{電位変動分}) \quad (2.17)$$

また、塩分を 3kg/m^3 含む場合の電位変動分を (2.18) により補正する方法も提案されている⁴⁶⁾。

$$\text{含水率による電位変動分 (mV)} = -20 \times X (\text{含水率、\%}) + 140 \quad (2.18)$$

ただし、 $X \geq 6$ では、補正を行わない。

さらに、補正自然電位と目視による腐食度の分類の関係として、表 2.6 が提案されている。

しかし、これらの判定基準は、塩害を受ける構造物を主対象としたものであり、全ての環境下のコンクリート構造物に適用できるとは限らない¹⁾。

また、自然電位および分極抵抗の測定においては、コンクリートが湿潤状態にあることが重要である⁴⁷⁾ ため、噴霧等を行った上で測定を行わなければならない。したがって、給水による含水率変化に伴う自然電位の変化についても適切に把握することが重要である。

表2.6 補正自然電位と鉄筋腐食度の関係

補正自然電位(mV vs CSE)	鉄筋腐食度	
$-250\text{mV}(-130) < E$	I	腐食がなく黒皮の状態
$-350\text{mV}(-230) < E \leq -250(-130)\text{mV}$	II	鉄筋表面に僅かな点錆が生じている状態
$-450\text{mV}(-330) < E \leq -350(-230)\text{mV}$	III	鉄筋表面に薄い浮き錆が生じており、コンクリートに錆が付着している状態
$E \leq -450(-330)\text{mV}$	IV	やや厚みがある膨張性の錆が生じているが、断面欠損は比較的少ない状態
	V	鉄筋全体に渡って著しい膨張性の錆が生じており、断面欠損がある状態

()内は、Ag/AgCl照合電極基準の場合

2.6.2 分極抵抗

自然電位は、本来はコンクリート中の鉄筋が腐食しているかどうかという可能性を示す指標にすぎない。これに対し分極抵抗法は、電極反応速度論から「腐食電流（腐食速度）は分極抵抗と呼ばれる腐食反応の抵抗と反比例の関係にある」ことを利用して、コンクリート表面に当てた電極から内部鉄筋へ微弱な電流を流したときの抵抗（分極抵抗）を測定して鉄筋の腐食速度を推定しようとする方法である。その方法は式(2.19)によって表される腐食電流値によって推定できる⁴⁸⁾。

$$I_{corr} = \left(\frac{b_a}{2.3} \right) \cdot \left(\frac{\Delta i}{\Delta E} \right) = \frac{K}{R_p} \quad (2.19)$$

I_{corr} ：腐食電流(A)、 b_a ：アノードターフェル係数、 Δi ：外部電流(A)、

ΔE ：自然電位からの分極(V)、 R_p ：分極抵抗(Ω)、

K ： I_{corr} と R_p の関係を表す係数(V)[一般に K 値と呼ばれる]

式(2.19)は鋼材表面に酸化被膜などの腐食生成物がなく、電解質の流動もないという理想的な状態における場合にのみ成立するものであり、実際には鉄筋の黒皮や乾湿繰返し作用によるコンクリート中での水分の移動が存在するため、 K 値を別に求める必要がある。一般に K 値は重量損失のデータと分極抵抗値を別々に求めて作成したものから実験的に求められている^{49)、50)}。

腐食速度については、図 2.9 に示す概念図によって説明できる。アノード反応によって生じた電子をカソードで消費するためには、アノード・カソード両反応が同一速度で進まなければならない。したがって腐食系の電気抵抗が十分に小さい場合には、両反応の分極曲線の交点が腐食速度となる。図 2.9 に示すように塩分が存在しない場合、溶存酸素量の多少にかかわらず、カソード分極曲線はアノード分極曲線の不動態部で交差し、腐食速度＝電流は非常に小さく I_p となる。これに対して、塩分がある濃度以上含んでいる場合、溶存酸

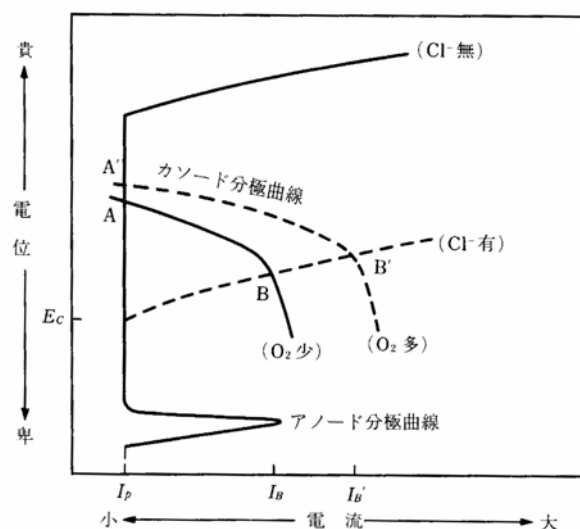


図 2.9 分極曲線の概念図と腐食速度

素量が多い場合には I_B' 、少ない場合は I_B として得られ、両者とも I_p よりもはるかに大きな腐食速度となる。なお、アノード・カソード間の電気抵抗が大きな場合、腐食起電力の一部がオーム電位降下によって消費されるため、腐食速度は小さくなる。

分極抵抗測定値と実際の腐食状況との相関関係については、分極抵抗逆数の時間積分値と腐食減量実測値の関係を求めた研究によると、室内試験および実環境における暴露試験ともに比例関係が認められている⁵¹⁾。また、海岸構造物に対して分極抵抗と鉄筋腐食量の実測値について検討を行った例によると⁵²⁾、分極抵抗の時間積分値と実測の鉄筋腐食量とはよい相関が得られていたという結果が得られている。CEB による判定基準を表 2.7 に示す⁵³⁾。

表2.7 CEBによる腐食速度の判定基準

腐食速度測定 $I_{corr}(\mu A/cm^2)$	腐食速度の判定	分極抵抗 R_{ct} ($k\Omega cm^2$)
0.1－0.2未満	不動態状態	130－260より大
0.2以上0.5以下	低～中程度の腐食速度	52以上130以下
0.5以上1以下	中～高程度の腐食速度	26以上52以下
1より大	激しい、高い腐食速度	26未満

2.6.3 コンクリート抵抗

コンクリート抵抗はコンクリートの組成、含水量、 Cl^- 等の塩類含有量などに依存し、腐食電池内を流れる腐食電流の大きさを支配するので、鉄筋の腐食速度に影響を与える要因の一つである。コンクリート中の鋼材の腐食状況を直接表すものではないが、鋼材の腐食性と密接な関わりがあることが知られている⁵⁴⁾。コンクリート抵抗の測定法としてはコンクリート試験体の両端に電極を当て電流を流す方法や実構造物を対象にした4点電極法がある。コンクリート表面から鉄筋に対して微弱な電流を流すことにより分極抵抗およびコンクリート抵抗 R_s が測定される。このコンクリート抵抗 R_s はコンクリート中の鉄筋腐食評価の場合、コンクリート表面に当てた照合電極と内部鉄筋との間のコンクリート抵抗に相当する⁵⁵⁾。したがって分極抵抗法における R_s 測定はコンクリート抵抗を求める一方法として位置づけられる。表 2.8 にコンクリート比抵抗による鋼材腐食性評価の例を示す。表 2.8 によれば、比抵抗が $20000 \Omega cm$ 以上であれば鉄筋腐食は生じない。この比抵抗の限界値を $50000 \sim 70000 \Omega cm$ の範囲とする文献⁵⁶⁾もある。い

ずれにしろ、コンクリートの比抵抗がこの値以上の場合には、鉄筋付近に塩分、酸素などが浸透しても、鉄筋腐食による被害は生じないといわれている。また、分極抵抗とコンクリート抵抗の相関関係より腐食速度を推定する方法についても試みられている⁵⁷⁾。

表 2.8 コンクリート比抵抗による鋼材腐食性評価の例

Cavalier and Vassie		Taylor Woodrow Res Lab		武若および小林	
比抵抗 ($\Omega \text{ cm}$)	腐食性	比抵抗 ($\Omega \text{ cm}$)	腐食性	比抵抗 ($\Omega \text{ cm}$)	腐食性
> 12000	徴候なし	> 20000	なし	> 10000	小さい
$5000 \sim 12000$	危険性 あり	$10,000 \sim 20000$	小さい	$5000 \sim 10000$	不確定
		$5000 \sim 10,000$	大きい		
< 5000	確実	< 5000	非常に大	< 5000	大きい

2.7 鉄筋コンクリート構造物の劣化予測に関する研究

構造物の信頼性解析については、耐荷力の分野では早くから研究が行われており、確率論的な荷重と構造物の耐力の関係もより詳細な解析が行われるようになってきている。しかし、構造物の耐久性に関する分野における信頼性解析は研究がなされ始めたばかりである。さらに、近年各種構造物の設計施工・維持管理を行う際において「性能規定」の概念が広く取り入れられつつある。この性能規定における維持管理を行うにあたって

は、非破壊検査による欠陥の検出確率を求め、信頼性設計を行うことが重要である⁵⁸⁾。中性化による鉄筋の腐食を確率論的に述べた研究⁵⁹⁾はあるが、塩分による研究はあまり行われていない。ここで、腐食確率という指標を用いることができれば、鉄筋腐食の状態が数値的に推測・判断可能となり、さらに将来にわたるライフサイクル

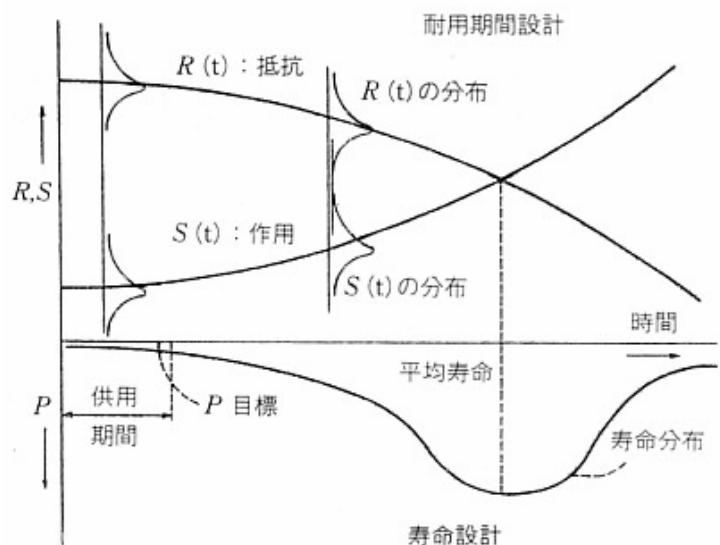


図 2.10 寿命設計の概念図

コストを含めた議論が可能となる。耐久性に関する信頼性解析は、ライフサイクルコストを議論するためには不可欠な要素であり、コンクリート構造物の空間的・時間的な設計を可能にし、維持管理を行うにあたっても重要な要素となるものである(図 2.10⁶⁰⁾参照)。鉄筋腐食による信頼性解析を用いて構造物の耐荷力の低下すなわち破壊確率の変化を検討した研究⁶¹⁾によると、サンプルを採取する間隔を小さくするほど腐食を原因とする耐力低下による破壊確率は大きくなるとの報告であった。また、水セメント比、かぶりおよび腐食限界塩分量について不確定性を考慮に入れた劣化予測を行ったときのひび割れの発生確率算出した研究例⁶²⁾もある。さらに、塩害劣化構造物に対してライフサイクルコストに基づいて最適な維持管理手法の選定に関する研究もなされている^{63)、64)、65)}。

参考文献

- 1) 小林一輔、小林豊治、米澤敏男、出頭圭三、コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3 “鉄筋腐食の診断”、森北出版、1993
- 2) 岡田清編：コンクリートの耐久性、朝倉書店、1986
- 3) 2002 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]、土木学会、2002
- 4) 岸谷孝一、西澤紀昭：コンクリート構造物の耐久性シリーズ、塩害(Ⅱ)、技法堂出版、pp58-59、1991
- 5) D.W.Pfeifer：High Performance Concrete and Reinforcing Steel With a 100-Year Service Life、PCI Journal、pp.46-54、2000
- 6) 大即信明、原茂雅光、胡信弘：モルタル中鉄筋の腐食に及ぼす暴露条件および塩素イオンの影響、セメント技術年報、No.40、pp103-106、1985
- 7) 大即信明、横井聡之、下沢治：モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響、土木学会論文集、No.360、pp111-118、1985
- 8) Browne、R.D.et al：Concrete in the ocean-marine durability of the tongue sand tower.CIRIA UEG Technical Report No.5、1980
- 9) U.R.Evans：The Corrosion and Oxidation of Metals、Journal of Chemistry、p1773、1930
- 10) 宮川豊章：土木コンクリート構造物の変状と補修・補強の考え方、コンクリート工学、Vol.31、No.7、pp25-31、1993
- 11) 丸屋剛、宇治公隆：コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.1、pp597-602、1989
- 12) 金谷光秀ほか：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp747-752、1996
- 13) 竹田宣典ほか：種々の海洋条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する研究、土木学会論文集、V -40、No.599、pp91-104、1998
- 14) 例えば、濱田秀則、Swamy、R、N：種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオン浸入過程および浸入量に関する一考察、コンクリート工学論文集、第 7 巻第 1 号、pp11-22、1996
- 15) Mohamed BOULFIZA、et al:Long Term Prediction of Chloride Ions Ingress in Uncracked and Cracked Concrete、土木学会論文集

- 16) K.Yokozeki : A Rational Model to predict the Service Life of RC Structure in Marine Environment、CANMET/ACI SP-170、pp777-799、1997
- 17) S.Helland : Service life of concrete offshore structure、Structural Concrete、 2、No.3、pp121-125、2001.9
- 18) コンクリート標準示方書 [維持管理編]、土木学会、2001
- 19) 日本下水道事業団編著 : 下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術および防食技術指針・同マニュアル、p.3、2002
- 20) 蒔田実、坂本浩之 : コンクリートの耐酸性について、第 27 回建設省技術研究会報告、1973
- 21) 日本下水道事業団 : 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル、pp.9 - 7、2002
- 22) JIS A 6206 (コンクリート用高炉スラグ微粉末) 解説、1995.3
- 23) 佐藤健一、鳥居和之、笹谷輝彦、川村満紀 : 電気化学的試験法による高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオン拡散係数の算定、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.961-966、1997
- 24) 依田彰彦、高田誠 : 20 年間海水の作用を受けた高炉セメントコンクリートの耐久性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.45、1991
- 25) セメント協会 : 海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究、コンクリート専門委員会報告、F-40、1987
- 26) 東邦和ほか : 海水飛沫を受ける RC 構造物の塩分浸透と鉄筋腐食に関する基礎実験、土木学会第 47 回年次講演会講演概要集、pp.388-389、1992
- 27) 中村士郎・小林孝一・宮川豊章・藤井学 : 高炉スラグ微粉末を用いた併用系高流動コンクリートの耐久性、土木学会第 51 回年次学術講演会、pp.714-715、1996
- 28) 小林孝一、竹本豊 : 高炉スラグ微粉末がコンクリートの鉄筋防食性能に与える影響について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.2、pp.553-558、1995
- 29) 小林孝一、服部篤史、宮川豊章 : 石灰石微粉末または高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートにおける塩分浸透と鉄筋腐食、土木学会論文集、No.613/V -42、175-187、1999
- 30) 竹田宣典、十河茂幸、迫田恵三 : シリカフュームを用いたコンクリートの海洋環境下における耐久性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.2、No.1、

pp.97-102、2000

- 31) 中村裕、小林忠司、米田正彦、前田直己：海洋環境下におけるシリカフェームコンクリートの力学的特性、塩分浸透および鉄筋腐食に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.2、pp.529-534、2001
- 32) 添田政司、大和竹史、江本幸雄：シリカフェームの使用がコンクリート中の鉄筋の腐食におよぼす影響、土木学会第44回年次講演会講演概要集、pp.246-247、1989
- 33) 宮川豊章：土木コンクリート構造物の変状と補修・補強の考え方、コンクリート工学、Vol.31、No.7、pp.25-31、1993.7
- 34) M.A.Berube、et.al:Influence of Wetting-Drying and Freezing-Thawing Cycles、and Effectiveness of Sealers on ASR、Proceedings of the 10th International Conference on AAR in Concrete、pp.1056-1063、1996.8
- 35) F.Salome : Field Evaluation of the Mitigating Effect of Silane Treatment on AAR in Concrete Railway Sleepers、Proceedings of the 10th International Conference on AAR in Concrete、pp.599-605、1996.8
- 36) 和田環、山下千明、新藤竹文：シラン含浸材料に関する基礎的研究、土木学会第42回年次講演会講演概要集、pp.422-423、1987、9
- 37) 久保善司、玉井譲、栗原慎介、宮川豊章：シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.1、pp.421-426、2001
- 38) A.Chowdhury.et.al : Vapour phase application of hydrophobic coatings to cement-based materials、Magazine of Concrete Research 、53、No.5、pp347-352、2001.9
- 39) 中田善久、枡田佳寛、鹿毛忠継、西山直洋：コンクリートの各種表面処理方法による塩化物イオン浸透抑制効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.765-770、1996
- 40) 田中博一、堀耕次、服部篤史、宮川豊章：シラン系はっ水剤の分子構造がコンクリートのはっ水性に与える影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.789-794、1995
- 41) 高流動コンクリート施工指針、土木学会、コンクリートライブラリー93、1998
- 42) ASTM C 876 : Half cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete、1977
- 43) BS 7361 : Part1、 Section 5、 Reinforcing steel in concrete、 1991

- 44) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針（案）、pp.93-97、1983.2
- 45) 佐々木孝彦、飯島亨、立松英信：自然電位による鉄筋腐食判定に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、vol.18、No.1、1996
- 46) 立松英信、佐々木孝彦、高田潤：塩害による鉄筋腐食の診断と抑制に関する研究、コンクリート工学論文集、vol.11、No.2、pp11-14、2000
- 47) コンクリート委員会腐食防食小委員会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、土木学会、p122、H9.12.1
- 48) 岡田清編：最新コンクリート工学、国民科学社、1986
- 49) C.Andrade、J.A.Gonzales：Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements、Werkstoffe und Korrosion、Vol.29、pp.515-519、1978
- 50) 横田優：電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食速度評価における Stern-Geary 式中の比例定数 B 値について、第 51 回セメント技術大会講演要旨、pp.314-315、1990
- 51) 松村卓郎、金津努、西内達雄：交流インピーダンス法による海岸暴露供試体の鉄筋腐食検査、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.1309-1314、1997
- 52) 横田優：電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.545-550、1990
- 53) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft 4)、BBRI-CSTC-WTCB、1997
- 54) Taylor Woodrow Research Laboratories：Marine Durability Survey of the Tongue Sands Tower、Concrete in the Oceans Technical Report No.5、CIRIA/UEG. CCA. Dept. of Energy、1980
- 55) コンクリート委員会腐食防食小委員会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、コンクリート技術シリーズ 26、土木学会、1997
- 56) 武若耕司：コンクリートの非破壊検査方法(原理と手法)ー鋼材腐食ー、コンクリート工学、vol.27、No. 3.1989.
- 57) 松村卓郎、金津努、西内達雄：海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法、土木学会論文集、No.634/V -45、pp.147-160、1999

- 58) 湯山茂徳：構造物の性能規定設計・管理における検査技術の動向、非破壊検査、Vol.21、No.1、pp3-7、2002.1
- 59) 小林豊治、米澤敏男、出頭圭三：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3「鉄筋腐食の診断」、森北出版、1993
- 60) 例えば CEB、New approach to durability design、1997.5
- 61) Tarama Williams.et.al：Reliability-Based Nondestructive Testing and Repair of Concrete Seawall、ACI Structural Journal、pp.166-174、2000
- 62) 林大介ほか：信頼性解析によるコンクリート構造物の塩害劣化評価に関する研究、土木学会第 58 回年次講演会講演概要集、pp.175-176、2003
- 63) 高橋稔明、酒井通孝、関博、松島学：海洋環境における RC 構造物の LCC 算定による補修工法および補修時期選定システムの開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.25、No.2、pp.1945-1950、2003
- 64) 相原康平、松下博通、鶴田浩章、佐川康貴：塩害環境下におけるコンクリート道路橋の LCC 評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26、No.2、pp.1783-1788、2004
- 65) 中川将秀、佐野清史、谷口修、濱田秀則：劣化進行モデルを用いた栈橋 RC 上部工の LCC 算定例、コンクリートの補修、補強、アップグレード論文報告集、第 4 巻、pp341-346、2004

第 3 章 コンクリートの塩分浸透性の評価

3.1 はじめに

第 3 章では、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート、さらにスランプ性状の異なるコンクリート中の塩分浸透性について検討を行った。また、アルカリ骨材反応対策としても用いられており、撥水剤として注目されているシランを塗布したコンクリートの塩分浸透性状についても検討を行った。さらに電気泳動試験による浸透性の評価も一部において実施し、塩分浸透に関するパラメータの評価手法についての検討も行った。

3.2 種々のコンクリートにおける塩分浸透性

3.2.1 実験概要

①コンクリートの配合

コンクリートとしては、通常程度のスランプ性状を持ったコンクリート（以下、普通コンクリートと表記する）および締固め不要である高流動コンクリートを用いた。水密性および化学抵抗性の向上に効果があるとされている高炉スラグ微粉末、または防食効果があり、海洋環境における耐久性向上に効果があるとされるシリカフュームを混和したコンクリートの浸透性状についてもあわせて検討を行うこととした。混和材はセメント置換とし、置換率については既往の研究から高炉スラグ微粉末については 60%、シリカフュームについては 10%とした。水結合材比については、塩分の浸透が十分に考えられる 60%とした。また、比較用に無混和の普通コンクリートも作成した。

表3.1 示方配合

	SLまたはSF(cm)	W/B (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						B×%(cc/m ³)		W×%(g/m ³)
				W	B			S	G	AE減水剤	AE助剤	増粘剤
					C	SF ^{*1}	SG ^{*2}					
普通 コンクリート	9±1	60	48	170	283	0	0	870	950	0.25	0.2	-
				175	117	0	175	841	933	1.6	0.3	-
				175	263	29	0	865	955	0.25 ^{*3}	0.3	-
高流動 コンクリート	55±5	60	48	175	117	0	175	841	933	1.8 ^{*3}	0.5	0.15
				175	263	29	0	865	955	3.7 ^{*3}	0.5	-

*1：シリカフューム

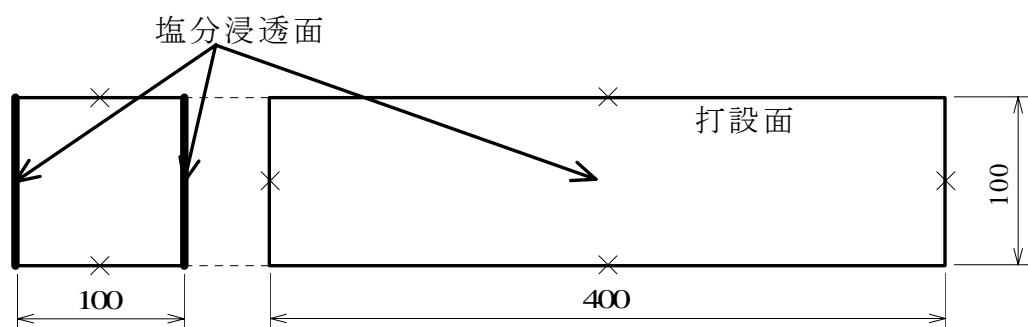
*2：高炉スラグ微粉末

*3：高性能AE減水剤を使用

用いた 5 種類の示方配合を表 3.1 に示す。なお、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートに関しては、材料分離抵抗性を与えるために増粘剤を用いた。

② 供試体の作成

セメントは普通ポルトランドセメント（比重 3.15、比表面積 $3,260 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）、シリカフュームは比重 2.20、比表面積 $200,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の粉体状のもの、高炉スラグ微粉末は比重 2.88、比表面積 $4,080 \text{ cm}^2/\text{g}$ のもの、細骨材は滋賀県野洲川産川砂（比重 2.55、F.M.2.49）、粗骨材は滋賀県土山産碎石（比重 2.61、最大寸法 15mm）を使用した。供試体は、角柱供試体（ $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ ）とした。打設 1 日後に脱型し、2 週間散水養生を行った後、図 3.1 のように打込み方向の影響を抑えるために、打設面に垂直な側面 2 面を残しエポキシ樹脂でコーティングを行った。シランを適用するものに関しては、塗布面をサンダーにより下地処理を行い、浸透面に対して刷毛塗りでシランを塗布した。



×印の部分にはエポキシ樹脂による遮塩コーティングを行っている

図 3.1 供試体概要図（単位：mm）

③ シランによる浸透抑制効果

筆者らの実験¹⁾により良好な撥水性が得られたと報告されている 2 種類の 100% シランを用いた。塗布量（ g/m^2 ）はコンクリート表面に変状を起こさない最大塗布量とした。それらの詳細を表 3.2 に示す。

表 3.2 シランの分子構造と塗布量

名 称	略 称	分 子 式	分 子 量	塗 布 量 (g/m ²)
デシルトリメトキシシラン	C ₁₀ メトキシ	C ₁₀ H ₂₁ Si(OCH ₃) ₃	262	100
ヘキシルトリエトキシシラン	C ₆ エトキシ	C ₆ H ₁₃ Si(OC ₂ H ₅) ₃	248	200

④環境条件

塩分濃度 5% (Cl⁻換算)の塩水を室内で毎日 1 回散水することにより乾湿繰返し状態を模擬した。散水は、打設面を上にした状態で静置し、暴露状態における供試体両側面に散水を行った。

⑤測定項目

コンクリート中の塩分量は経時的に測定を行った。

JCI 腐食防食研究委員会が定めた「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準案(JCI-SC)」に基づいて、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法(JCI-SC4)を用いて、全塩分量および可溶性塩分量の測定を行った。測定においては、まず図 3.2 の切断図①のように長手方向に厚さ 40mm にコンクリートカッターを用いて切断し、その切断片に対して図 3.2 の切断図②のように両側の浸透面から深さ方向に 10mm ごとに切断した試料を使用した。測定後は切断面をエポキシ樹脂でコーティングし、再び暴露を行うことによって複数の暴露時期に塩分量の測定を行えるようにした。

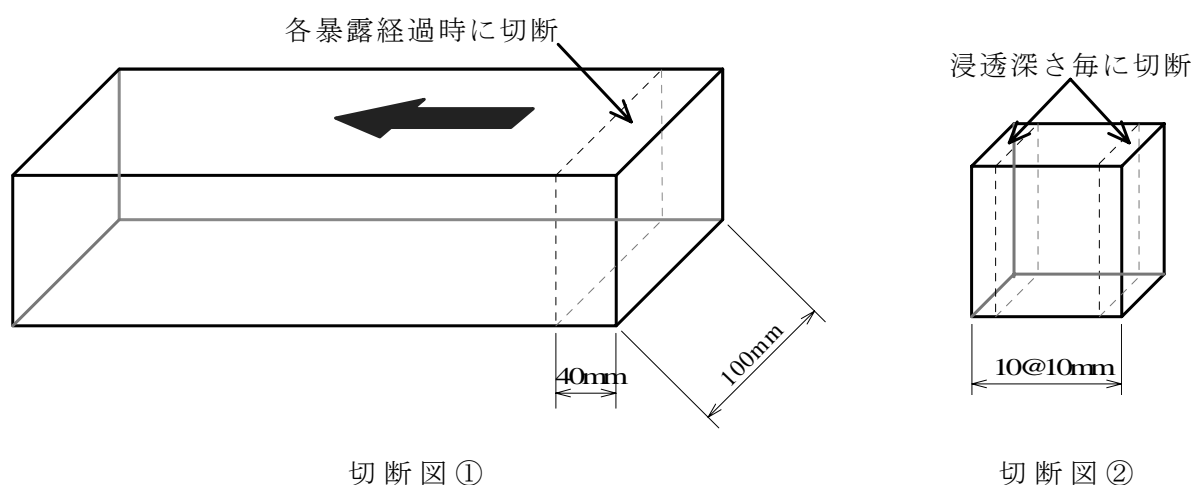


図 3.2 塩分量測定用の試料作成方法（点線部でカッティング）

3.2.2 混和材を用いたコンクリート中の塩分の存在形態

普通コンクリートおよびシリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの全塩分量と可溶性塩分量の関係を図 3.3 に示す。

普通セメントを用いたコンクリートに関しては、 W/C および環境条件にかかわらずほぼ線形の関係にある。一方、シリカフュームまたは高炉スラグ微粉末を混和したものに関しては、無混和のものと同様に線形関係があると考えられ、その場合の傾きは無混和とほぼ同様あるいは若干小さな値となっている。

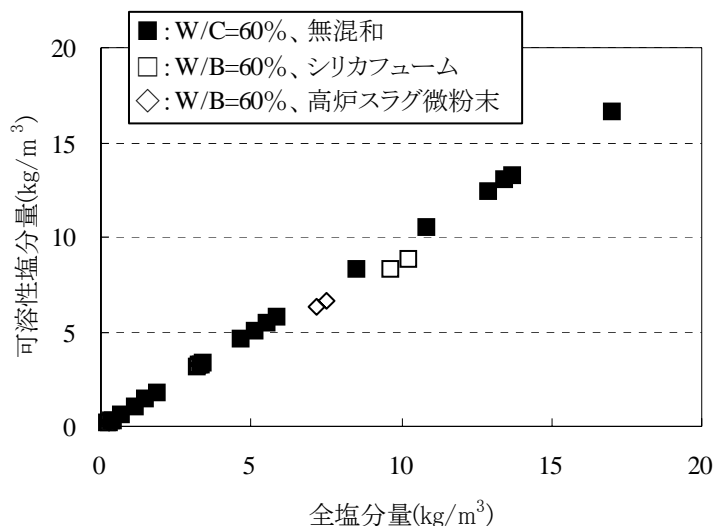


図 3.3 全塩分量と可溶性塩分量の関係

全塩分量と可溶性塩分量との間に線形関係が認められたことから、

コンクリート中では浸透した塩分が一定の割合で固定されているものと考えられる。また、混和材の種類による有意な違いは認められなかった。高炉スラグ微粉末においては従来の研究により塩化物イオンを固定化する能力に優れているとされているが、シリカフュームにおいても同等の固定化能力を有しているものと考えられる。

コンクリート中のセメント水和物に固定化される塩化物イオン量として、全塩分量と可溶性塩分量の差を結合材重量との比で表したものと全塩分量との関係を図 3.4 に示す。無混和では、全塩分量が 5.0kg/m^3 以下では、固定塩分量は 0.1% 以下となっている。しかし、全塩分量が 5.0kg/m^3 以上では、全塩分量が大きいほど固定塩分量も大きくなっており、全塩分量が 15kg/m^3 程度で固定塩分量は 0.4% 程度となっている。一般に、塩化物イオンはセメント重量の約 0.4% までが腐食に無関係なフリーデル氏塩として固定化されていると考えられている²⁾。今回の実験では、測定上での可溶性塩分の不安定性によるものと考えられるが、全塩分量によって固定塩分量は異なり、全塩分量によらず一定量が固定されるというものとは異なる結果が得られた。また、混和材を用いたコンクリートに関しては、全塩分量が 5.0kg/m^3 以下では、無混和と同様に固定塩分量は 0.1% 以下であったが、

全塩分量が 5.0kg/m^3 以上では、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの方が無混和に比べて大きくなった。無混和に比べてシリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和した方がより多くの塩化物イオンが固定されることにより、同量の塩分が浸透した場合においても鉄筋の腐食抑制効果が期待できるものと考えられる。しかし、塩分量によって固定化される塩分量が異なっており、普通セメントと同様に 0.4%程度が最大となっている。したがって、セメント量に対して 0.4%の塩化物イオン量が固定されるものの、それに対応する可溶性塩化物イオン量もまた存在するものと考えられる。

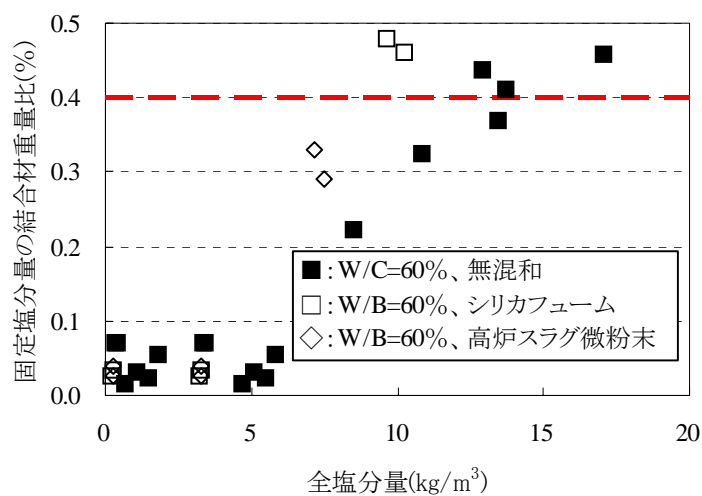


図 3.4 全塩分量と固定塩分量の結合材重量比の関係

3.2.3 コンクリート中の塩分浸透性状

① 混和材による影響

混和材無混和の普通コンクリートおよび、シリカフュームまたは高炉スラグ微粉末を混和した普通コンクリートの暴露 1 年および 2 年後の各深さにおける全塩分量を図 3.5 に示す。

なお、全塩分量については、深さ方向に厚さ 10mm のサンプルにおいて測定したもので、その厚さ内での平均値である。そこで、以降、浸透深さはサンプルの中央深さ、例えば 10～20mm 区間に対して 15mm と表す。

シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートに関しては、いずれの深さにおいても同一の水セメントで無混和のコンクリートの、1/2 から 1/3 程度に全塩分量は低減されていた。混和材の種類に関しては、暴露 1 年および 2

年後において明確な差は認められなかった。これは、シリカフュームについては、混和したことによるポゾラン反応およびマイクロファイラー効果によって緻密な組織となり、高炉スラグ微粉末についても潜在水硬性によって組織が緻密となったためであると考えられる。同一の水結合材比の場合、シリカフュームまたは高炉スラグ微粉末を混和することにより、塩分の浸透抑制効果が期待できるものと考えられる。

また、暴露期間に関しては、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートにおいては、表面から 15mm 程度までの表面近傍の全塩分量は暴露 1 年と 2 年で大きな差はみられないが、15mm 以深では全塩分量の増加がみられた。内部への浸透が生じにくいために表面近傍に滞留すると考えられるが、今回の実験においては表面近傍の全塩分量については、滞留は認められず無混和のコンクリートよりも小さいという結果が得られた。

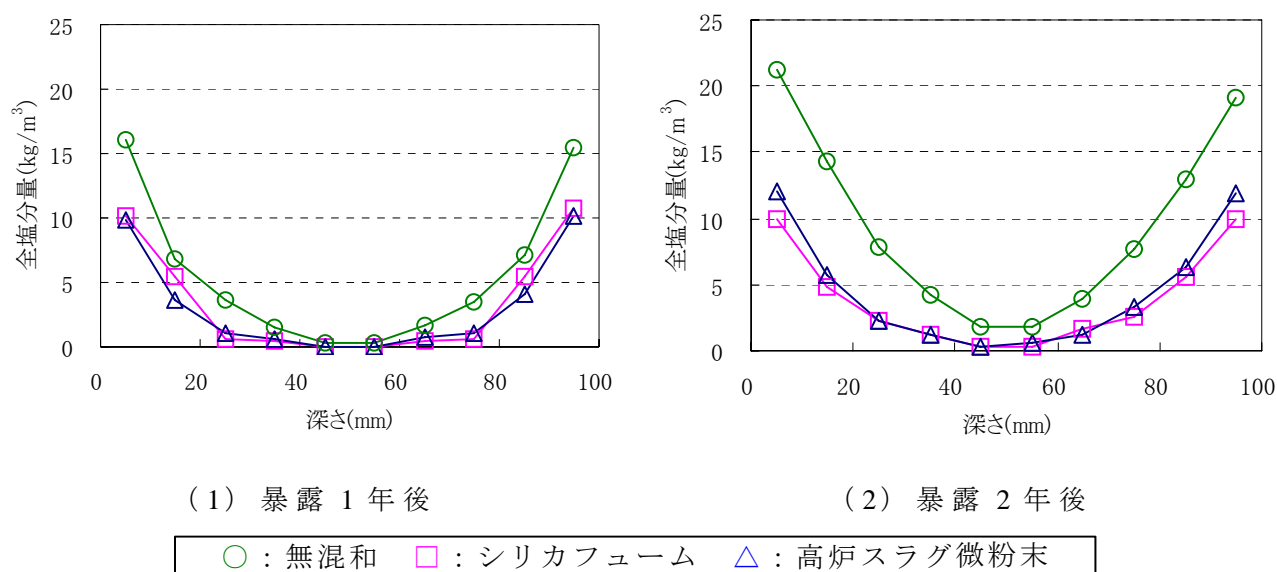


図 3.5 混和材の影響

②スランプ性状による影響

シリカフューム、あるいは高炉スラグ微粉末を混和した普通および高流動コンクリートの暴露 1 年および 2 年後の全塩分量を図 3.6 に示す。

シリカフュームおよび高炉スラグ微粉末において、高流動コンクリートの方が普通コンクリートよりも塩分浸透量が小さくなっている点もあるが、逆転してい

る点もあり、普通と高流動コンクリートによる明確な傾向は認められなかった。塩分浸透性に関しては普通コンクリートと高流動コンクリートにおけるスランプ性状の影響は少ないものと考えられる。また、暴露 2 年後において、シリカフューム混和したコンクリートの方が高炉スラグ微粉末を混和したものより塩分浸透量が小さくなっているのは、シリカフュームの方が粒子がきわめて小さいためにセメント粒子間の隙間を埋める効果が高炉スラグ微粉末より大きくより緻密なコンクリートが形成されたためと考えられる。

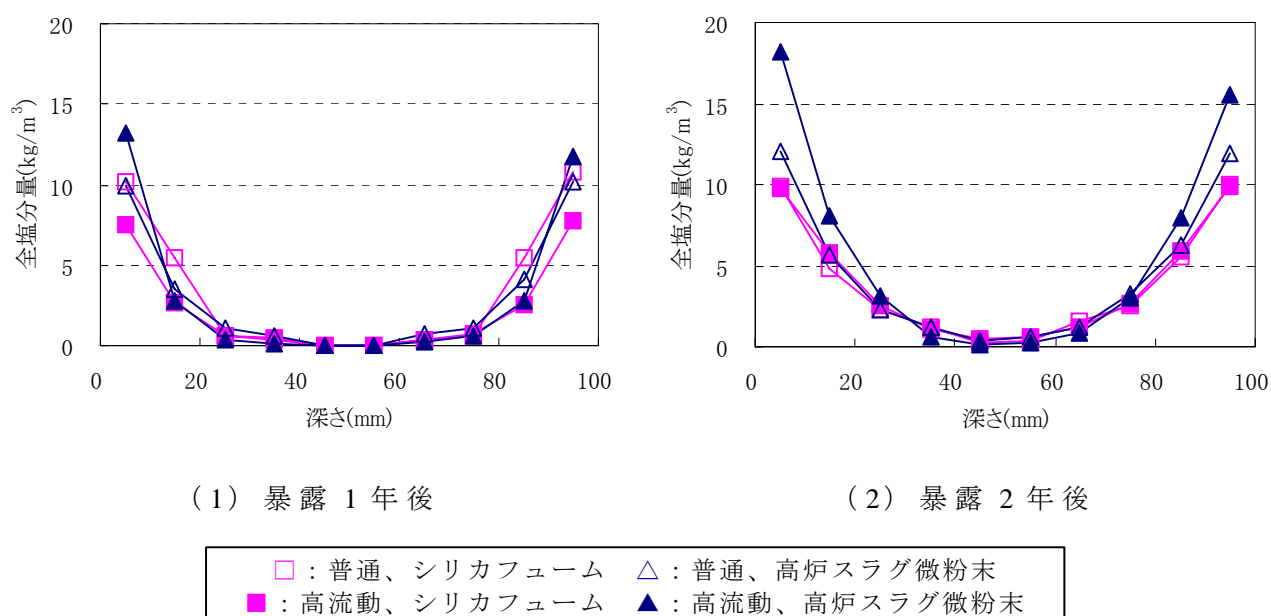


図 3.6 スランプ性状の影響

③ シラン処理による影響

デシルトリメトキシシラン、ヘキシルトリエトキシシランによる表面処理を行った無混和の普通コンクリートの暴露 1 年および 2 年後の全塩分量を図 3.7 に示す。

暴露 1 年後では、デシルトリメトキシシラン、ヘキシルトリエトキシシランを用いたコンクリートは無処理と比べて塩分浸透量はきわめて小さく、表面を除いてまったく塩分は検出されなかった。撥水効果のあるシランは内在塩分がない場合においては大きな浸透抑制効果が期待できると考えられる。しかし、暴露 2 年後では、ヘキシルトリエトキシシランを塗布したコンクリートは 1 年後とあまり

変化は見られないが、デシルトリメトキシシランを塗布したコンクリート中に塩分の浸透が認められた。これは塩水の噴霧によってシランの撥水効果が低下したためと考えられる。デシルトリメトキシシランは親水基がメトキシ基（ OCH_3 ）であるためにコンクリート中での加水分解速度が大きく、塗布時にコンクリート内部まで含浸せずに表面のみに撥水層が形成されている。これに対し、ヘキシルトリエトキシシランは、親水基がエトキシ基（ OC_2H_5 ）であるためにメトキシ基を有するデシルトリメトキシシランよりも加水分解速度が小さく、より大きな撥水層（5mm 程度）を形成しているとの報告がある³⁾。このため、デシルトリメトキシシランでは表面の劣化後すぐに塩分の浸透が開始するが、ヘキシルトリエトキシシランでは表面は劣化しても内部の撥水層が存在しているために、浸透抑制効果が持続したものと考えられる。塩分浸透の防止法としてシランを用いる場合は、シランの劣化による再塗布を行う必要があると考えられる。

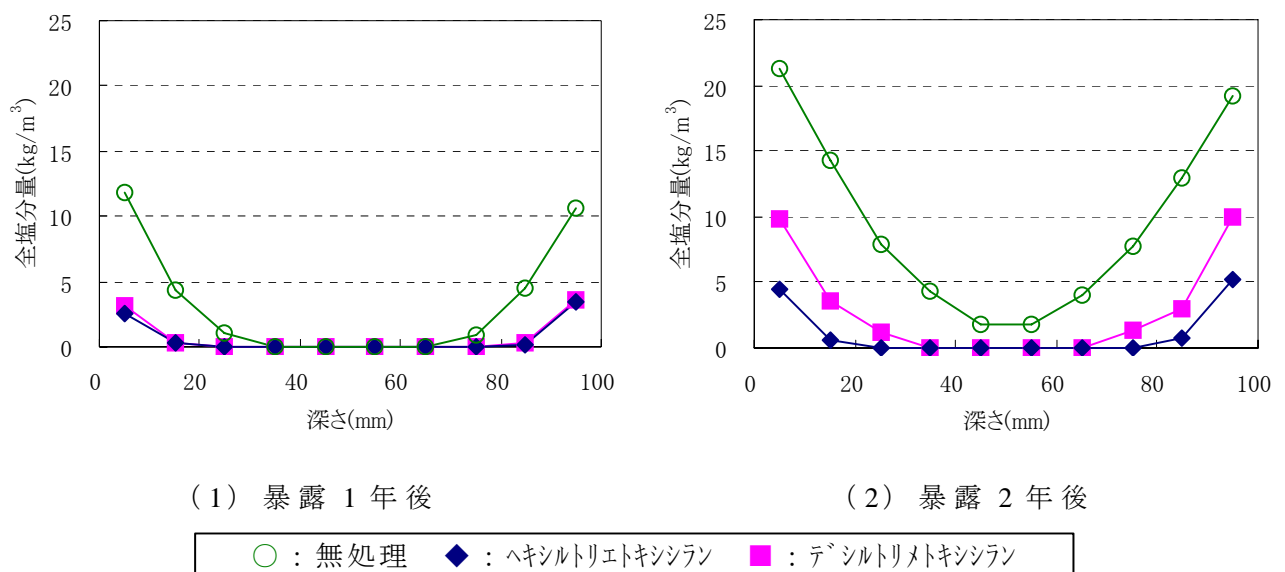


図 3.7 シラン処理の影響

3.2.4 表面塩分量および拡散係数

各供試体において暴露期間 6 ヶ月、1 年および 2 年での表面塩分量 C_0 および拡散係数 D の算出を行った。第 2 章における式 (2.5) に基づいて最小二乗法を用いて算出を行い、図 3.1 に示すように供試体両側面から得られた値を平均している。ただし、シランを含浸させたコンクリートは、塩分浸透量が小さいので表面塩分

量および拡散係数を求めている。

① 表面塩分量の経時変化

各供試体における表面塩分量の経時変化を図 3.8 に示す。無混和および高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートについては、暴露期間とともに表面塩分量は大きくなる傾向が認められた。これに対し、シリカフェュームを混和したコンクリートについては、暴露期間によらずほぼ一定の値を示していた。表面塩分量に関しては、暴露期間とともに大きくなるという報告^{4) 5)}があり、無混和および高炉スラグ微粉末については同様の傾向が見られた。塩水噴霧によ

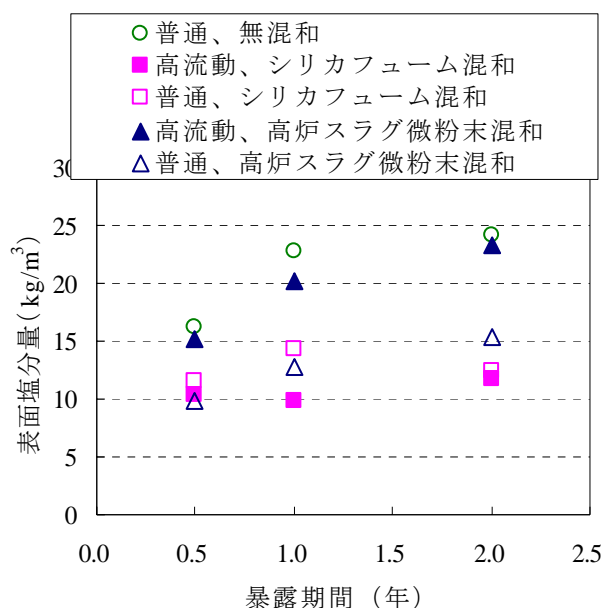


図 3.8 表面塩分量の経時変化

る乾湿繰返しによって、表面付近に塩分が蓄積され、表面塩分量が増加していくものと考えられる。しかし、シリカフェュームについては、コンクリート内部の塩分量は増加しているにもかかわらず表面付近は変化していないという結果が得られた。これは、シリカフェュームを混和することによって、粗骨材下部におけるブリージングの影響による脆弱部の形成が抑制されたために、無混和および高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートに比べて、表面付近では飽和状態となったために乾湿繰返しの影響が低減されたと考えられる。

② 拡散係数

全塩分量分布の測定値を用いて算出した各供試体における拡散係数の経時変化を図 3.9 に示す。図中には 2002 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕における方法により算出した拡散係数についても示している。経時変化に関しては、高炉スラグ微粉末を混和した普通コンクリートを除いて、暴露期間 1 年で減少し、暴露 2 年では再び増加する傾向が見られた。拡散係数の経時変化については、セメントの未水和の部分が時間とともに反応するので、拡散係数は経時的に小さくなるといわれている^{4) 6)}。これに対して、実構造物から採取した塩分浸透量から算出された拡散係数の経時変化の報告⁷⁾によると、暴露期間が 20 年以上の長期

にわたる場合においては、セメントの水和反応の効果は小さくなり、コンクリート中の拡散係数はほぼ一定であるとしている。今回の実験においては、暴露 6 ヶ月および 1 年では拡散係数の算出に用いた点が 3 点と少なかったこともあり、明確な傾向は認められなかった。種々の海洋実構造物から採取したコアサンプルの測定結果によると、海中部および飛沫帯では経時的に増加するという報告⁸⁾もされているので、さらに長期の暴露実験により傾向の判断を行うのが望ましいと考えられる。

実際には、表面塩分量も経時的に増加しているため、塩分量分布から得られた拡散係数よりも大きいと考えられる。

一方、実験により得られた拡散係数と示方書による計算値に関しては、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは、暴露期間による差が大きく計算値とは一致していないという結果であった。しかし、シリカフェューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの拡散係数では、暴露 2 年後のシリカフェュームを混和したコンクリートを除いて、実験値と計算値は比較的一致した値を示していた。

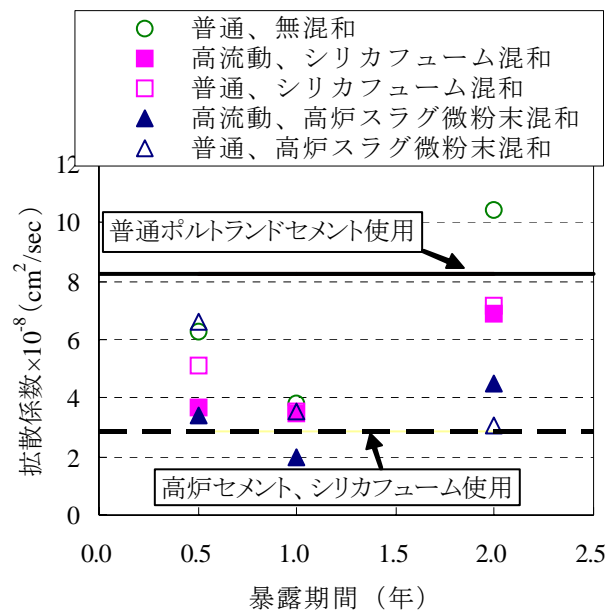


図 3.9 拡散係数の経時変化

3.3 促進試験における塩分浸透性状の評価

3.3.1 実験概要

① コンクリートの配合

水結合材比としては、通常の土木構造物に用いられる 55% とした。用いた混和材については、シリカフェュームを置換率 10% で、高炉スラグ微粉末は置換率 60% としセメント置換することにより配合設計を行った。また、超高強度コンクリートの塩分浸透性を把握するために、結合材としてシリカセメントを用い水結合材比は 17% とした。また、超高強度コンクリートについては練混ぜ時に消泡剤を用いた。表 3.3 に示方配合を示す。

表3.3 示方配合

配合名	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						B×%		
					W	C	SF ^{*1}	SG ^{*2}	S	G	AE減水剤	AE助剤	消泡剤
NN55	8±1	4±0.5	55	44.8	182	331	0	0	790	996	0.25	0.2	0
SF55						298	33	0	791	978	0.25 ^{*3}	0.3	0
SG55						132	0	199	789	976	1.6	0.3	0
T-0	60±5	2±0.5	17	43.8	155	912 ^{*4}	0	0	618	795	1.6 ^{*3}	0	0.1

*1：シリカフューム

*2：高炉スラグ微粉末

*3：高性能AE減水剤を使用

*4：シリカフュームをプレミックスしたセメントを使用

② 供試体の作成

セメントは超高強度コンクリートのみシリカフュームをプレミックスしたセメント（比重 3.08、比表面積 6120 cm²/g）を用いた。その他は低熱ポルトランドセメント（比重 3.24、比表面積 3230 cm²/g）に、シリカフュームは比重 2.20、比表面積 200,000cm²/g の粉体状のもの、高炉スラグ微粉末は比重 2.88、比表面積 4,080 cm²/g のものを混和することにより、供試体の作成を行った。細骨材は宮城県名取産安山岩砕砂（比重 2.64、F.M.2.74）、粗骨材は宮城県名取産安山岩碎石（比重 2.65、最大寸法 20mm）を使用した。供試体は円柱供試体（φ 100×200mm）とした。打設 1 日後に脱型し、28 日間水中養生を行った後、側面にエポキシ樹脂でコーティングを行った。

③ 試験方法および測定項目

試験方法としては、「JSCE-G571-2003 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」⁹⁾（以下、電気泳動試験と表記する）に準拠して、実効拡散係数を求めることとした。また、実際の浸透状況と比較検討するために同時に「JSCE-G572-2003 浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」⁹⁾（以下、浸せき試験と表記する）も実施した（図 3.10 参照）。

測定項目は、電気泳動試験については、NaOH 溶液中の塩化物イオン濃度を測定し、浸せき試験については第 3 章の 3.2 と同様に深さ方向の全塩分量を測定した。

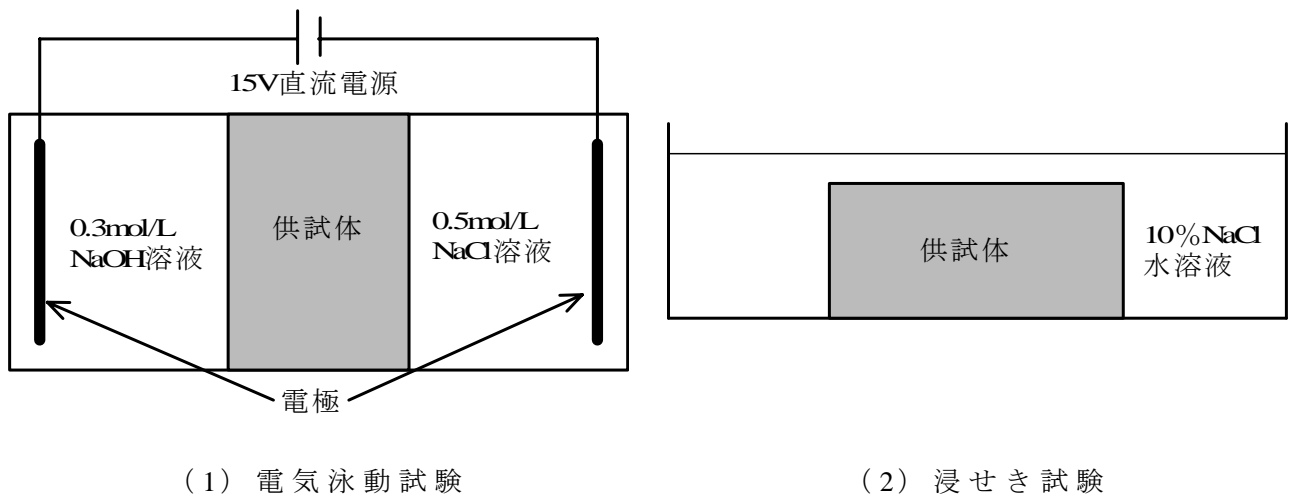


図 3.10 試験概略図

3.3.2 電気泳動試験による実効拡散係数の評価

実効拡散係数の計算法については、電気化学法則（Nernst-Planck の式）を適用して以下の式（3.1）、（3.2）に基づいて算出を行った。

$$J_{Cl} = \frac{V \Delta c_{Cl}}{A \Delta t} \quad (3.1)$$

ここに、 $J_{Cl}(\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年}))$ ：塩化物イオンの定常状態における流束

$V(\text{L})$ ：陽極側の溶液体積

$A(\text{cm}^2)$ ：供試体断面積

$\Delta C_{Cl}/\Delta t ((\text{mol/L})/\text{年})$ ：陽極側塩化物イオン濃度の増加割合

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (3.2)$$

ここに、 $D_e(\text{cm}^2/\text{年})$ ：実効拡散係数

$R((\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})))$ ：気体定数

$T(\text{K})$ ：絶対温度測定値

Z_{Cl} ：塩化物イオンの電荷

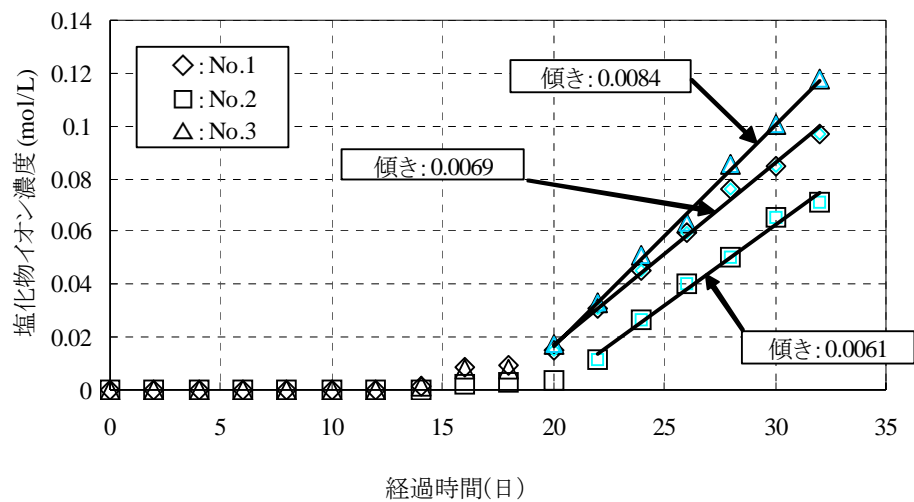
$F(\text{C/mol})$ ：ファラデー定数

$C_{Cl}(\text{mol/L})$ ：陰極側の塩化物イオン濃度測定値

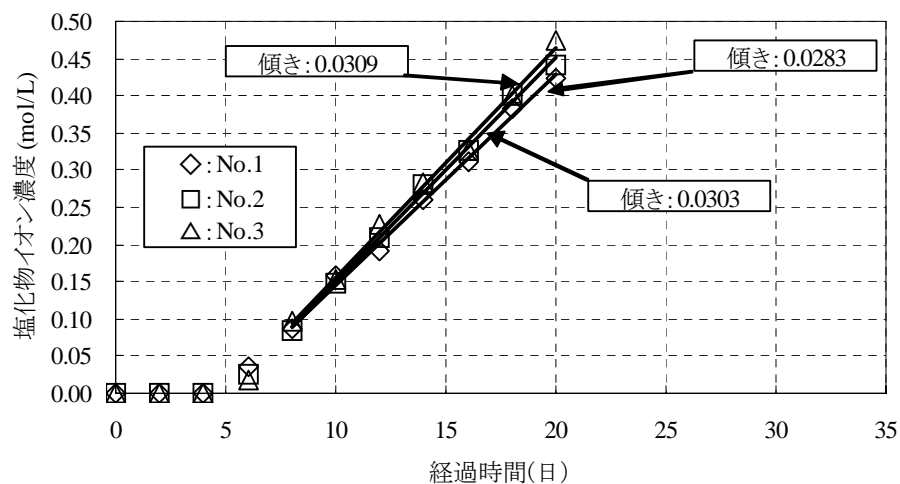
$\Delta E - \Delta E_c (\text{V})$ ：供試体表面間の測定電位

$L(\text{mm})$ ：供試体厚さ

陽極側の塩化物イオン濃度の変化の一例として、超高強度コンクリート（T-0）および無混和のコンクリート（NN55）供試体について図 3.11 に示す。通常の水セメント比である NN55 の場合では通電開始後 6 日で陽極側に塩化物イオンが検出され始めているが、T-0 では検出開始まで 15 日程度経過している。また、T-0 では塩化物イオンの検出量も NN55 の場合と比べて 1/4 程度ときわめて小さな値となっていた。水結合材比が 17% と非常に小さいために、電圧を印加した状態においても塩化物イオンの移動に対しての抵抗は大きいものと考えられる。



① 超高強度コンクリート（T-0）



② 無混和コンクリート（NN55）

図 3.11 塩化物イオン濃度の経時変化

図 3.12 に式 (3.1) および (3.2) に基づいて算出した各コンクリートにおける実効拡散係数を示す。無混和のコンクリートに比べて、シリカフュームあるいは高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは若干小さくなった。電気泳動試験による結果からも、混和材の使用により塩分浸透が抑制することが確認された。

また、超高強度コンクリートについては、水結合材比 55% と比べて 1/4 程度であることから、低水結合材比で塩分浸透の抑制効果が高いと考えられる。低水結合材比のコンクリートに対しても、電気泳動試験を用いた塩分浸透性の評価は可能であると考えられ、実環境における塩分の浸透性とあわせて評価することが今後の課題であると考えられる。

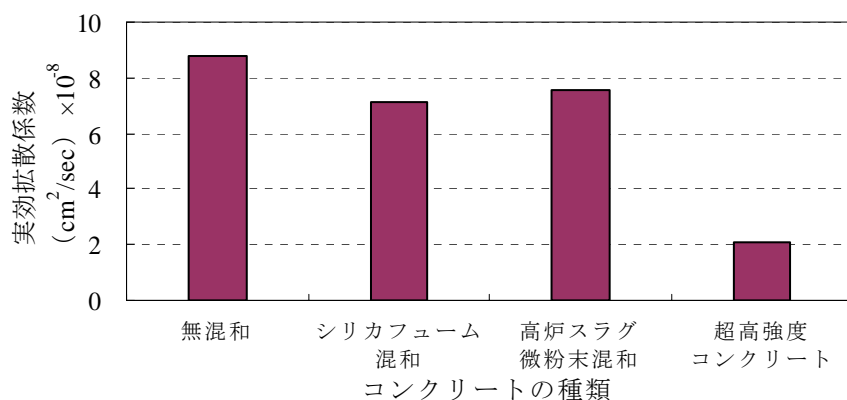


図 3.12 各コンクリートにおける実効拡散係数

3.3.3 実効拡散係数と見かけの拡散係数の関係

浸せき試験により得られた暴露 6 ヶ月における、各コンクリート中の塩分浸透量を図 3.13 に示す。なお、超高強度コンクリートにおいては、ごく表層付近においてのみ塩分が検出されているので、見かけの拡散係数の評価を行っていない。無混和のコンクリートが混和材を用いたコンクリートよりも塩分浸透量は大きく、シリカフュームと高炉スラグ微粉末の差は認められなかった。これは、電気泳動試験の傾向とほぼ一致しており、混和材を用いたコンクリートにおいても電気泳動による促進試験は有効であると考えられる。

次に、浸せき試験の結果より算出した見かけの拡散係数と電気泳動試験 (D_e) による実効拡散係数 (D_{ap}) の比および 2002 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕に基づいた計算値を表 3.5 に示す。無混和のコンクリートに比べて、シリ

カフューム、高炉スラグ微粉末を混和した方が D_{ap}/D_e は小さくなった。海水を模擬した 3% の塩水による乾湿繰返し試験、あるいは浸せき試験を行った場合、高炉セメントを用いると D_{ap}/D_e は小さくなるという報告^{10)、11)} がされている。10% と高濃度の塩水を用いた場合においても、高炉スラグ微粉末、シリカフュームを用いたコンクリートでは、 D_{ap}/D_e に関して同様の傾向が見られた。これは、乾湿繰返しを受ける環境では、コンクリート表面付近の細孔溶液中の塩分濃度は、10% 程度のなっているとの報告¹²⁾ もあるため、同様の傾向が得られたと考えられる。また、セメント水和物中の塩化物イオンの固定化が大きいほど D_{ap}/D_e は小さくなるという関連があるとされている。そのため、シリカフューム、あるいは高炉スラグ微粉末を混和することによって、水密性の向上に加えてコンクリート中の塩化物イオンの固定化能力が向上し、塩分浸透の抑制に影響を与えたと考えられる。また、固定化能力が高いことから、鉄筋腐食に対しても抑制効果が期待できると考えられる

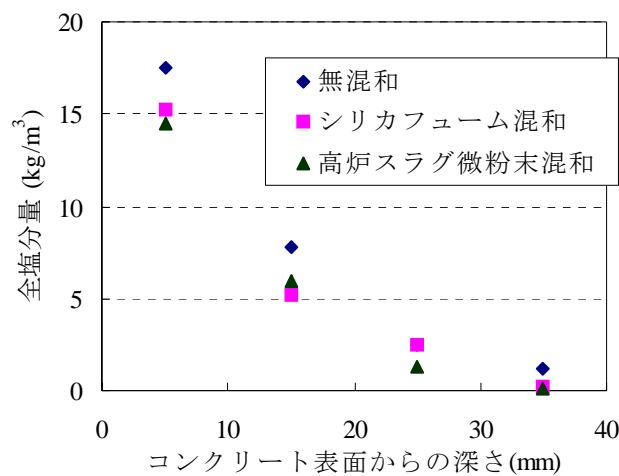


図 3.13 各コンクリートの塩分浸透量

表3.5 実効拡散係数と見かけの拡散係数

	コンクリート標準示方書 [施工編] $D_p(\times 10^{-8}, \text{cm}^2/\text{sec})$	実効拡散係数 $D_e(\times 10^{-8}, \text{cm}^2/\text{sec})$	見かけの拡散係数 $D_{ap}(\times 10^{-8}, \text{cm}^2/\text{sec})$	D_{ap}/D_e
無混和	8.28	8.75	10.80	1.23
シリカフューム混和	2.89	7.13	6.40	0.90
高炉スラグ微粉末混和	2.89	7.54	5.44	0.72

3.4 本章のまとめ

本章の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1)乾湿繰返しによる暴露試験により、無混和の普通コンクリートに比べて、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは同一水結合材比においても十分な塩分浸透に対する抑制効果が認められた。また、普通コンクリートと高流動コンクリートのスランプの違いによる塩分浸透性については明確な傾向は認められなかった。
- (2)シランにより表面処理を行ったコンクリートは、無処理と比べて大きな抑制効果が見られ、塩害防止対策として適用が可能であると考えられる。しかし、浸透深さが小さなシランについては、定期的な再処理が必要となると考えられる。
- (3)表面塩分量および拡散係数の経時変化に関して暴露期間が2年であるが、表面塩分量は暴露期間とともに大きくなる傾向が見られ、無混和のコンクリートにおいてその傾向が顕著であった。シリカフュームを混和したコンクリートはほぼ一定となり、表面近傍における塩分の滞留は認められなかった。一方、拡散係数では暴露期間が短期間であることもあり明確な傾向は認められなかった。
- (4)電気泳動試験および浸せき試験による各々の拡散係数の算出結果から、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、無混和に比べて塩化物イオンの固定化能力に優れているために、水密性の向上とともに塩分の浸透抑制に大きな影響をおよぼしていると考えられる。
- (5)水結合材比が17%の超高強度コンクリートの塩分浸透に対してきわめて大きな抑制効果を有しているものと考えられる。

参考文献

- 1) 玉井 譲、久保善司、服部篤史、宮川豊章、栗原慎介：100%シランの分子構造およびコンクリートの含水状態が撥水性に与える影響、土木学会第54回年次講演会講演概要集、pp.82-83、1999、9
- 2) Richartz,W: Die binding von Chlorid bei der Zementerhartung, Zement-Kalt-Gips, Heft 10, 1969, pp.447-456
- 3) 久保善司、玉井 譲、栗原慎介、宮川豊章：シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp421-426、2001
- 4) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その2）、コンクリート技術シリーズ 40、2000
- 5) A.Costa, J.Appleton: Chloride Penetration into Concrete in Marine Environment, Material and Structures, Vol.32, pp.354-359, 1999
- 6) S.Helland: Service Life of Concrete Offshore Structures, Structural Concrete, Vol.2, No.3, pp.121-125, 2001
- 7) A.Lindvall,et.al: Chloride Ingress Data from Danish and Swedish Road Bridges Exposed to Splash from De-icing Salt, Proceeding of the 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modeling the Chloride Ingress into Concrete, pp.85-103, 2001
- 8) 濱田秀則、R.N.Swamy：種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸入過程および浸入量に関する一考察、コンクリート工学論文集、Vol.7、No.1、pp11-22、1996
- 9) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向、コンクリート技術シリーズ 55、2003
- 10) 細川佳史、山田一夫、高見満、杉山隆文：浸せき法および電気泳動法により評価した塩化物イオン拡散係数に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp725-730、2003
- 11) 吉田行、田口史雄、渡辺宏：高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの塩分浸透性、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp639-644、2002
- 12) 丸屋剛、S.Tangtermsirikul、松岡康訓：コンクリートの表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化、土木学会論文集、No.585、V-38、pp.79-95、1998

第4章 鉄筋腐食の非破壊検査手法の評価

4.1 はじめに

第4章では、コンクリート中の鉄筋腐食に対して通常用いられている電気化学的な非破壊検査手法（自然電位、分極抵抗）に対して、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和することによる影響について検討を行った。また、硫酸劣化したコンクリート中の鉄筋腐食に関しては、非破壊検査手法の適用性について検討を行うと同時に、硫酸侵食に伴う腐食発生メカニズムおよびその進行過程についても検討を行った。

4.2 混和材の使用が腐食モニタリング指標に与える影響

4.2.1 実験概要

① コンクリートの配合

コンクリートとしては、通常程度のスランプ性状を持ったコンクリート（以下、普通コンクリートと表記する）を用いた。水密性および化学抵抗性の向上に効果があるとされている高炉スラグ微粉末、または防食効果があり、海洋環境における耐久性向上に効果があるとされるシリカフュームを混和したコンクリートの浸透性状についてもあわせて検討を行うこととした。混和材はセメント置換とし、置換率については既往の研究から高炉スラグ微粉末については60%、シリカフュームについては10%とした。水結合材比については、塩分の浸透が十分に考えられる60%とした。また、比較用として無混和のコンクリートについても作成した。用いた3種類のコンクリートの示方配合を表4.1に示す。

表4.1 示方配合

配合	G _{max} (mm)	W/B (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						単位量 (cc)	
				W	C	Sg	SF	S	G	AE減水剤	AE助剤
NN6015	15	60	48	170	283	0	0	870	950	708	566
SG6015	15	60	48	175	117	175	0	864	954	730	584
SF6015	15	60	48	175	263	0	29	865	955	4670	875

② 供試体の作成

セメントは普通ポルトランドセメント、シリカフュームは比重2.20、比表面積200,000cm²/gの粉体状のもの、高炉スラグ微粉末は比重2.88、比表面積4,080cm²/g

のもの、細骨材は滋賀県野洲川産川砂（比重2.55、F.M.2.49）、粗骨材は滋賀県土山産碎石（比重2.61、最大寸法15mm）を使用した。供試体は100×200×1600mmの梁型供試体とし、長さ1500mmの鉄筋（D10）を、端部を研磨後に長さ500mmの絶縁被覆つきコードをハンダ付けし、この部分を自己融着テープとエポキシ樹脂で被覆したもの4本を図4.1に示すように配置した。

③養生および環境条件

供試体は材齢1日で脱型を行い、材齢28日まで室内に静置し散水養生を行った。養生終了後、室内で打設面を上にした状態で静置し、両側面に対して毎日1回ずつ塩分濃度5%（Cl⁻換算）の塩水を散水し、乾湿繰返し条件となるようにして腐食を促進させた。

④測定項目

コンクリート中に埋設した鉄筋に対して、自然電位および分極抵抗を定期的に測定した。飽和銀塩化銀電極（Ag/AgCl）を照合電極として用い、分極抵抗測定は、腐食状況がある程度局部的に得られる交流インピーダンス法（交流電圧：±10mVp-p、周波数：10Hzから20mHz、ステンレス製円盤からなる径4cmの対極およ

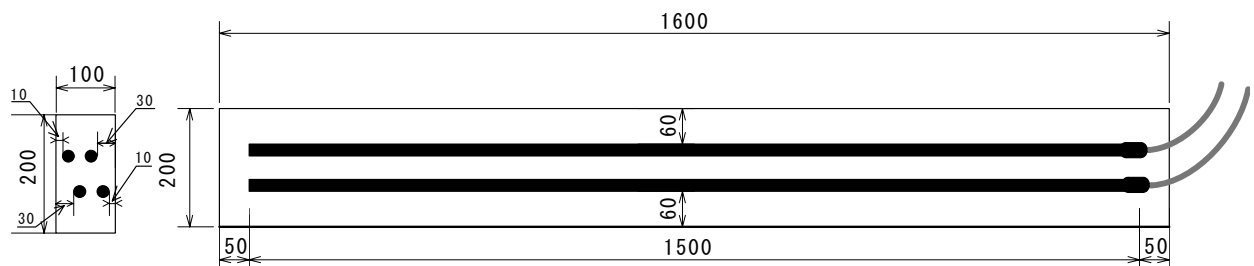


図 4.1 供試体図 （単位：mm）

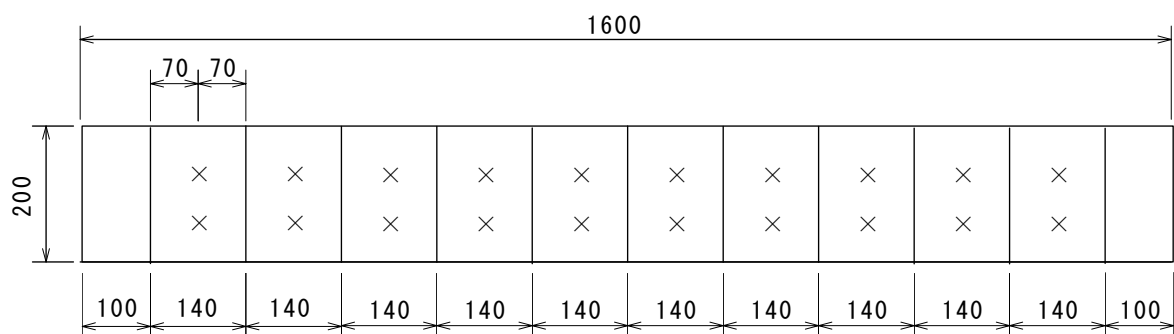


図 4.2 測定位置（単位：mm）

び径11cmのガード対極を用いた2重対極方式、D10に対して被測定面積 6.2cm^2)を用いて行った。測定は、図4.2に示すように1本の鉄筋につき10点(鉄筋直上)の両側面において行った。

また、腐食面積率については、図4.2に示す140mm毎に切断し、はつりだした鉄筋の表面画像を取り込み、色差による画像処理を行い、目視による判定と合わせて測定を行った。

4.2.2 自然電位と分極抵抗との関係

暴露開始6ヶ月および1年後における自然電位と分極抵抗の関係を図4.3に示す。後述する腐食面積率の結果より暴露開始6ヶ月後は腐食開始直後であり、1年後については腐食がある程度進行した鉄筋も含まれている。無混和のコンクリートについては、6ヶ月および1年後ともに自然電位が卑なほど分極抵抗が小さくなる傾向が見られた。暴露1年後の方が6ヵ月後よりもその傾向が顕著となっており、今回の実験のように、腐食傾向から非腐食傾向まで広い範囲にわたっている場合においては、自然電位と照合電極直下の鉄筋の腐食状態を表していると考えられている交流インピーダンス法により得られた局所的な分極抵抗の間に線形関係が見られたものと考えられる。

また、シリカフュームを混和したものについては、無混和と同様の傾向を示しており、自然電位と分極抵抗の関係においては通常のコンクリートと同様に検討を行ってよいと考えられる。しかし、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート

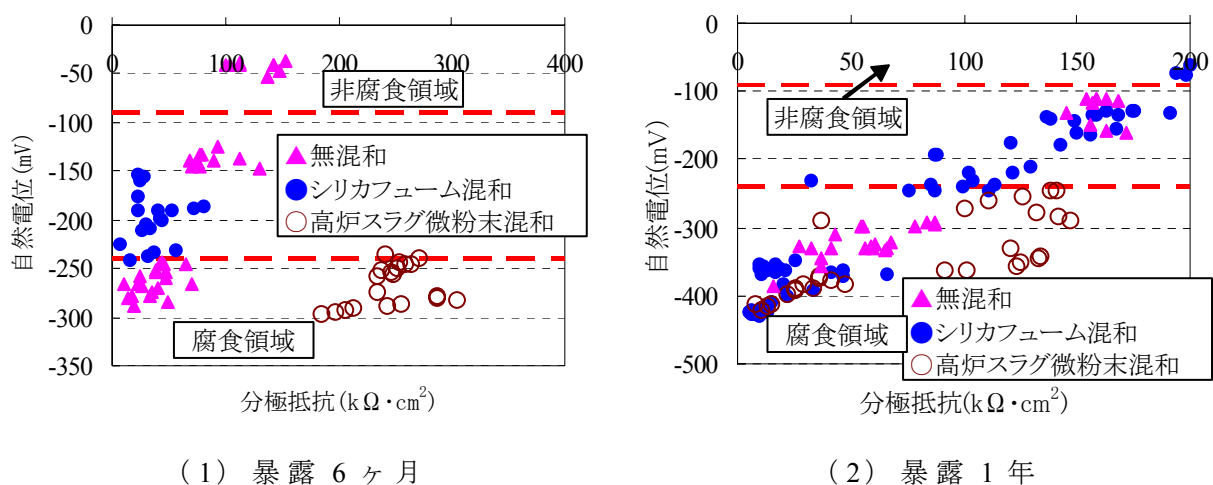


図 4.3 自然電位と分極抵抗の関係

については、同一の分極抵抗値であっても自然電位は卑な傾向を示している。特に暴露 6 ヶ月後においては顕著であり、分極抵抗では腐食傾向を示していないにも関わらず、自然電位は -250mV 以下と腐食傾向を示している。自然電位が卑化する原因としては、高炉スラグ微粉末を用いることにより、鉄筋とペースト部間の界面性状が異なったためと考えられる。したがって、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートに対して、自然電位に関する従来の基準を用いて鉄筋腐食を非破壊的に判断するのは困難であり、自然電位とともに分極抵抗を用いて腐食の判断を行なう必要がある。

4.2.3 腐食面積率と自然電位の関係

暴露開始後 6 ヶ月および 1 年における腐食面積率と自然電位の関係を図 4.4 に示す。暴露 6 ヶ月後の測定では、多くの測定点で腐食面積率が 1% 前後とあまり腐食は生じていなかった。ASTM C 876¹⁾ 規格によると、自然電位の値が -240mV 以下では 90% の確率で腐食が生じているとされているが、今回の研究の範囲では -240mV 以下の場合においてはばらつきは大きいがほぼすべての測定点で腐食が認められ、不確定領域である -90mV から -240mV の場合においても、 -240mV 以下よりは腐食面積率は小さいもののすべての鉄筋で腐食が認められた。暴露 1 年後においても同様の傾向が見られたが、90% の確率で腐食が生じていないとされる -90mV 以上においても腐食している鉄筋が存在するなど、腐食・非腐食の判断においては不確定な部分が多いと考えられる。これは、非腐食部が分極され、同一

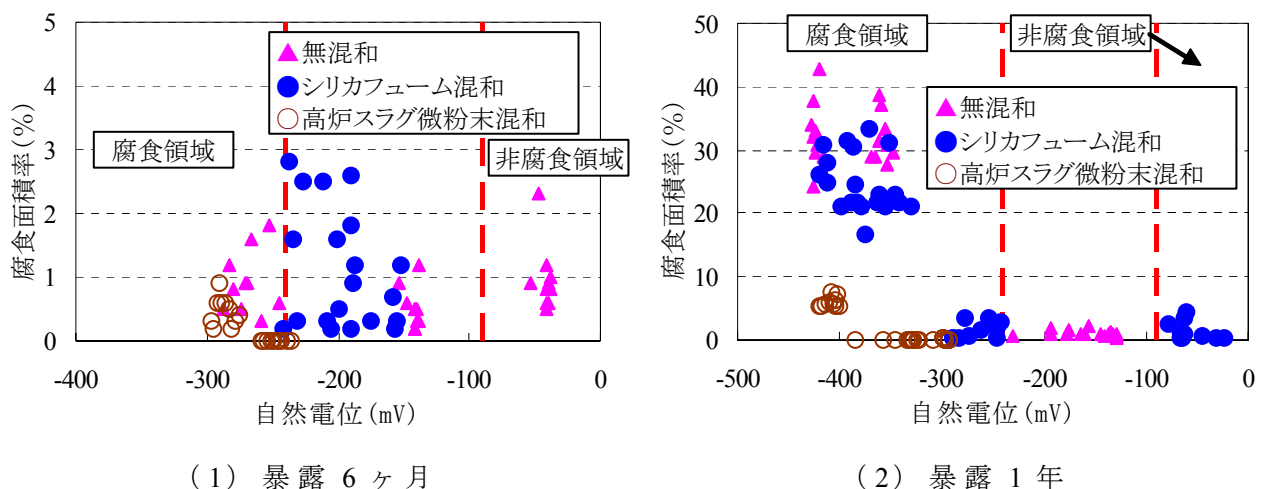


図 4.4 腐食面積率と自然電位の関係

の鉄筋に対して測定した 10 点の自然電位が平均化する傾向にあることも一因と考えられる。自然電位より腐食の位置および開始について判定を正確に行うのは困難と考えられ、分極抵抗など他の非破壊試験をあわせて検討することが必要である。

一方、シリカフュームを混和したものについては、暴露 1 年後において、自然電位が -240mV 以下でも腐食が生じていないものも多く、また腐食部と非腐食部の差が大きいことから判定基準にさらなる検討が必要である。また、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートについては、腐食していないにも関わらず自然電位が -300mV 以下を示している。しかし、 -450mV 以下では腐食が生じているものも見られることから、自然電位と腐食面積率はある程度関係はあると考えられる。そのため、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートについては、独自の腐食判定基準を定める必要があると考えられる。

また、同一の鉄筋に対して全測定点 10 箇所中、鉄筋の腐食が認められた箇所数の割合をその鉄筋における腐食発生確率と定義し、暴露 6 ヶ月および 1 年における各測定点で得られた自然電位と腐食発生確率の関係を併せて図 4.5 に示す。なお、腐食面積率が 1.0% を腐食・非腐食の境界としている。ASTM 基準では、 -90mV 以上では 90% 以上の確率で腐食しておらず、 -230mV 以下では、90% 以上の確率で腐食しているとされているが、無混和のコンクリートについてはほぼ同様の結果が得られた。しかし、シリカフュームを混和したコンクリートについては不確定領域の腐食発生確率が大きくなっており、高炉スラグ微粉末を混和したものでは、腐食領域に存在しているにもかかわらず、腐食発生確率はきわめて小さな値

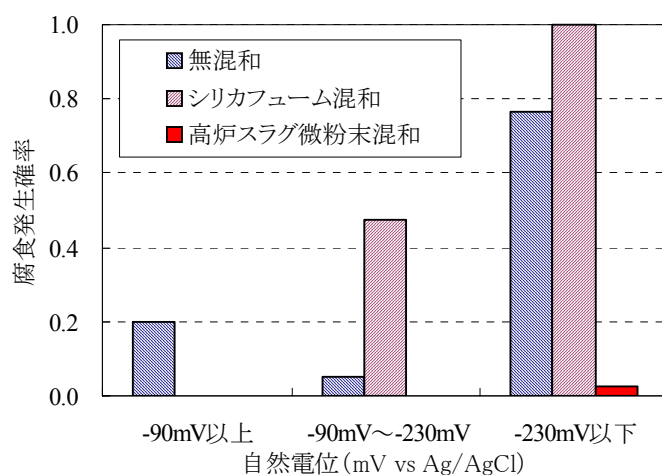


図 4.5 自然電位と腐食発生確率の関係

となった。無混和のコンクリートについては、ASTM 基準を用いて腐食・非腐食の判断は可能であると考えられるが、混和材を用いたコンクリートについては、新たな判断基準を設定する必要があると考えられる。

4.2.4 腐食面積率と分極抵抗の関係

暴露期間 6 ヶ月および 1 年における腐食面積率と分極抵抗逆数の時間積分値の関係を図 4.6 に示す。暴露 1 年後においては、無混和のコンクリートでは、積分値が 20 以上では、ばらつきは大きいものの、積分値によらず腐食面積率はほぼ一定の値となっている。一方、シリカフェームを混和したコンクリートについては、積分値が 20 以下では、積分値が大きいほど腐食面積率が大きくなっている。積分値が 20 以上については、無混和と同様に腐食面積率が一定の傾向を示している。高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートについては、腐食面積率が小さく明確な傾向は得られなかった。

無混和および混和材を用いたコンクリートによらず積分値が 20 以下については分極抵抗逆数の時間積分値と腐食面積率には相関があると考えられる。また、マクロセル腐食においては、腐食面積率が大きくなるとそれ以降の腐食面積率の増加は鈍化するために一定となったと考えられる。ガード対極を有する交流インピーダンス法を用いて得られた分極抵抗の値については、今回の実験においては腐食面積率が 30% 以下の場合においては積分値と腐食面積率に相関が見られ、局部的な鉄筋の腐食状況を表していると考えられる。

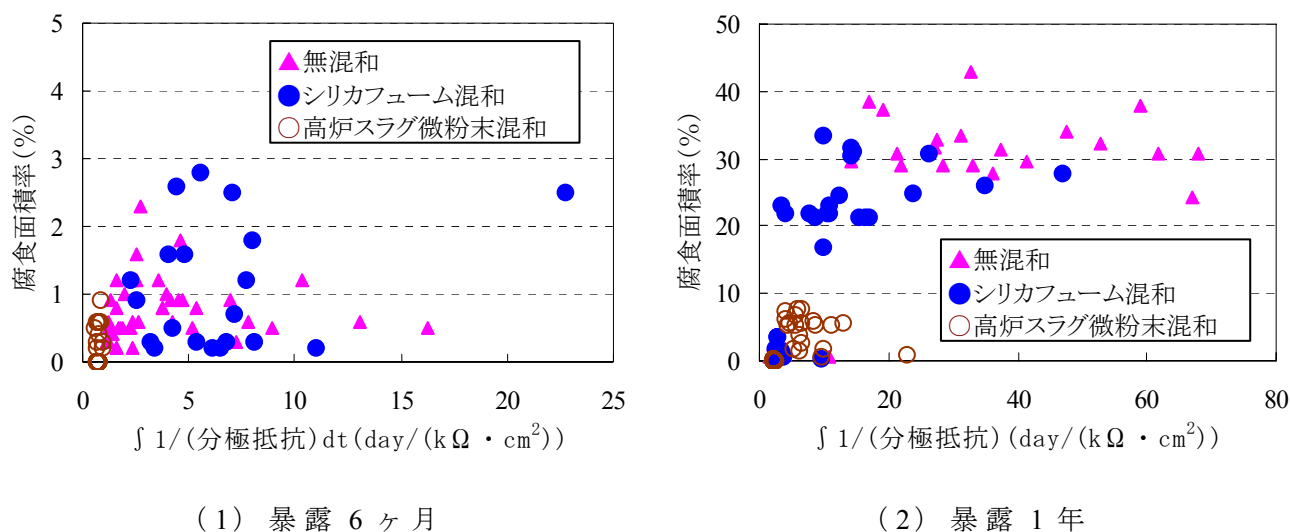


図 4.6 腐食面積率と分極抵抗の関係

4.3 化学的侵食による腐食が腐食モニタリング指標に与える影響

4.3.1 実験概要

① コンクリートの配合

コンクリートおよびモルタルの示方配合を表 4.2 に示す。水セメント比(以下、W/C)は硫酸イオンの浸透が硫酸による侵食に対して卓越すると考えられる 60%²⁾とした。モルタルはより単純な系として用い、コンクリートから粗骨材を除いた配合とした。

表4.2 示方配合

	G _{max} (mm)	S.L. (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(cc/m ³)		NaCl (g/m ³)
						W	C	S	G	AE減水剤	AE助剤	
コンクリート	15	8±1	4±0.5	60	51	170	283	936	927	708	1132	494*
モルタル	-								-			

*塩水環境の供試体のみ添加

② 供試体の作成

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は滋賀県野洲川産川砂（比重 2.55、F.M.2.49）、粗骨材は滋賀県土山産碎石（比重 2.61、最大寸法 15mm）を使用した。供試体の寸法はいずれも 100×50×400mm とし、長さ 300mm の鉄筋(D10)を供試体中心に配置した。電気化学的鉄筋腐食モニタリングのために、鉄筋は端部を研磨後、絶縁被覆つきコードをハンダ付けし、この部分を自己融着テープとエポキシ樹脂で被覆して図 4.7 に示すように配置した。

③ 養生および環境条件

供試体は材齢 1 日で脱型を行い、材齢 28 日まで室内において水中養生を行った。

環境条件を表 4.3 に示す。浸せきにおいては室温で鉄筋中心位置まで溶液に浸し（図 4.8 参照）、乾湿繰返しは浸せき 3 日、乾燥 4 日（室内）を 1 サイクルとした。

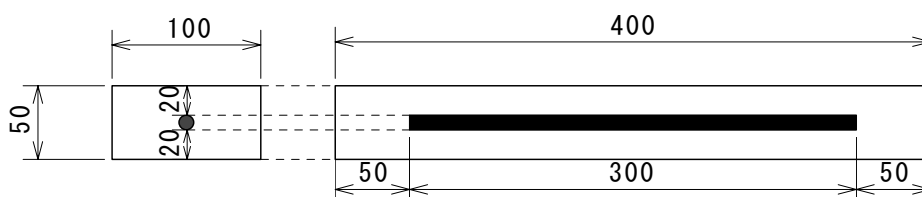
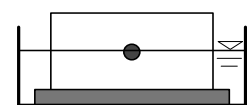


図 4.7 供試体形状(単位 mm)



ポリプロピレン製の棒

図 4.8 浸せき状況

硫酸水溶液の濃度は、コンクリートとの反応における腐食速度や腐食形態が異なると考えられる³⁾ 低濃度の 0.15w% (pH=1.51)、高濃度の 2.0w% (pH=0.389) の 2 種類とした。また硫酸劣化との比較のために海水を模擬して NaCl が 3.0w% の塩水も設定した。

なお、塩水に供する供試体は、作成時に 0.3kg/m^3 となる NaCl を外割で混入した。

表 4.3 環境条件

	濃度	環境	供試体
硫酸水溶液	2.0 w %	浸せき	コンクリート、モルタル
		乾湿繰返し	コンクリート、モルタル
	0.15 w %	乾湿繰返し	コンクリート、モルタル
塩水	3.0 w %	乾湿繰返し	コンクリート、モルタル

④測定項目

各材齢において、目視による外観観察に加えて、侵食深さの測定、電気化学的鉄筋腐食モニタリングおよび鉄筋腐食量の測定を行った。

今回の実験では、全測定項目において人為的な脆弱部除去を行っていない。また、乾湿繰返しでは乾燥 4 日目に、浸せきでは測定前日に溶液から取り出し約 1 日室内で乾燥後に全供試体について測定を行った。

・硫酸イオン浸透深さ

供試体の切断面に 0.2w% ジメチルスルホナゾーⅢ水溶液と 2.0w% 塩化バリウム水溶液を順に霧吹きで噴霧し、青色から赤色に呈色する範囲を硫酸イオン浸透深さとし³⁾、その深さをノギスにより各供試体につき 100mm 間隔の 3 断面で測定した(図 4.9 参照)。非浸せき面から測定することにより、変色深さについては消失部も含めた値となっている。

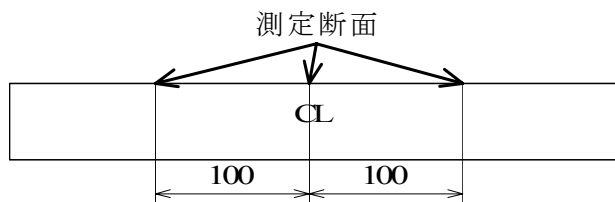


図 4.9 切断位置 (単位: mm)

・試薬による pH 分布測定

供試体の切断面にメチルオレンジ、メチルレッド、ブロモチモールブルー、フ

フェノールフタレインの各 pH 指示薬を噴霧し、呈色状態により断面の pH 値変化を観察し、試薬の非呈色反応深さ（酸性領域）をノギスにより各供試体につき 100mm 間隔の 3 断面で測定した（図 4.9 参照）。

硫酸イオン浸透深さと同様に測定し、非呈色深さについては消失部も含めた値となっている。

用いた指示薬の呈色範囲（pH）とその変色について表 4.4 に示す。

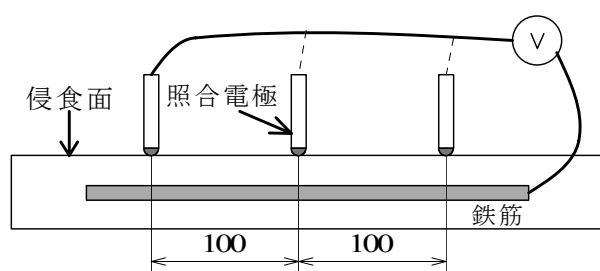
表 4.4 各指示薬の呈色範囲と変色 ⁴⁾

指示薬名	酸性色	変色域の pH	塩基性色
メチルオレンジ	赤	3.1～4.4	黄
メチルレッド	赤	4.2～6.3	黄
ブロモチモール ブルー	黄	6.0～7.6	青
フェノール フタレイン	無	8.3～10.0	赤

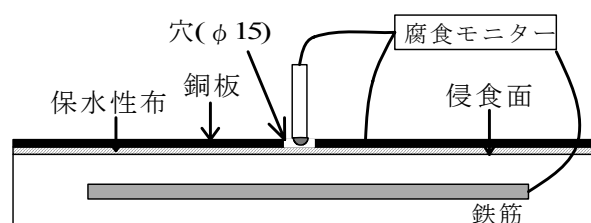
・電気化学的鉄筋腐食モニタリング

定期的に自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗を測定した。飽和銀塩化銀電極（Ag/AgCl）を照合電極として用いた。実際の測定状況を考慮し、侵食面からの測定とした。

自然電位は、各供試体につき 100mm 間隔で 3 箇所の侵食面の鉄筋直上で測定した。分極抵抗およびコンクリート抵抗は、矩形波電流分極法（電流値：10 μ A～1 mA、周波数：0.1Hz および 0.8kHz、被測定面積：長さ 30cm×周長 3cm=90cm²）により、侵食面と同じ大きさの銅板を対極として侵食面に設置し測定した。なお、対極として用いた銅版の中心を開口し、その部分に照合電極を当てることにより測定を行った。以上の電気化学的鉄筋腐食モニタリングの概要を図 4.10 に示す。



(1) 自然電位 (単位 mm)



(2) 分極抵抗および
コンクリート抵抗

図 4.10 電気化学的鉄筋腐食モニタリングの概要

4.3.2 硫酸による侵食が鉄筋腐食に与える影響

暴露 350 日目における 2.0w% 硫酸水溶液浸せきおよび乾湿繰返しのモルタル供試体の断面における、ジメチルスルホナゾーⅢ水溶液の赤変深さおよび pH 指示薬による非呈色深さを図 4.11 に示す。なお、0.15w% 硫酸水溶液では、いずれの指示薬でも明確な呈色深さが認められなかった。

浸せきの方が乾湿繰返しよりも呈色深さが大きく、断面減少と同様に硫酸水溶液と接触する期間が影響していると考えられる。また、各指示薬については、硫酸イオン浸透深さの指標となるジメチルスルホナゾーⅢ水溶液（図中 DSⅢ）の赤変深さが最も大きく、ついでフェノールフタレイン（同 PP）、ブロモチモールブルー（同 BTB）、メチルレッド（同 MR）、メチルオレンジ（同 MO）の順となっていた。二水石膏の生成部（目視による白色の脆弱部）においては、pH が 3～4 まで低下（MO で非呈色）している部分もあった。しかし、ジメチルスルホナゾーⅢ水溶液によっては、鉄筋位置までの硫酸イオンは確認されていない。

各指示薬により推定されるモルタル供試体中の硫酸イオン浸透深さおよび pH 分布（暴露 350 日目）を図 4.12 に示す。図に示すように、硫酸劣化によるコンクリート中の鉄筋の腐食発生においては、フェノールフタレインの非呈色域よりも深部にまで硫酸イオンが浸透している。このため、不動態被膜が破壊される程の pH の低下が生じる前の、硫酸イオンによる被膜の破壊および腐食進行の可能性を検討する必要があると考えられる。

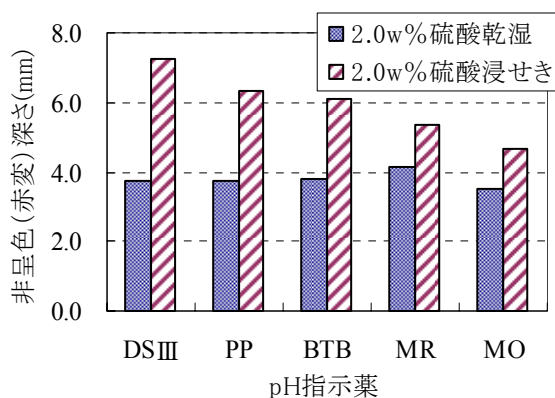


図 4.11 各 pH 指示薬の非呈色深さ
(暴露 350 日目、モルタル供試体)

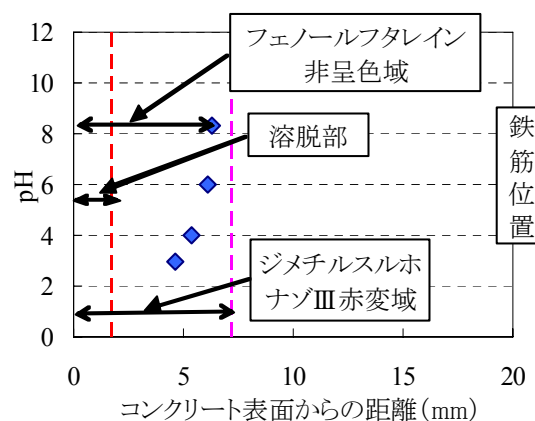


図 4.12 硫酸イオン浸透範囲および pH
(暴露 350 日目、モルタル供試体、
2.0w% 硫酸浸せき)

4.3.3 硫酸水溶液中での鉄筋の電気化学的特性

まず、硫酸の影響を受ける鉄筋単体の自然電位の特性を検討するため、0.15w% および 2.0w% の硫酸水溶液と 3.0w% の塩水に L 字型に曲げ加工した鉄筋を単体で浸せきし、照合電極を溶液中に挿入した状態で自然電位の測定を行った(図 4.13 参照)。その経時変化を図 4.14 に示す。

いずれの溶液に浸せきした場合でも、コンクリート中(図 4.15 参照)あるいは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液中⁵⁾ と比べて電位は卑な傾向にあった。3.0w% 塩水に浸せきしたものが最も卑な傾向にあり、次に 0.15w% 硫酸水溶液、2.0w% 硫酸水溶液となった。硫酸水溶液と塩水中の鉄筋が異なった傾向を示すのは、カソード部の反応が中性あるいはアルカリ性では式(4.1)のように酸素の還元反応であるのに対し、酸性では式(4.2)のように水素イオンの還元反応が生じていること⁶⁾ から、この反応の違いにより自然電位に差が生じたものと考えられる。



このことから、コンクリート中の鉄筋に対して得られる自然電位の評価には、既往のものとは異なる基準が必要であるものと考えられる。第 2 章の図 2.3 におけるプールベ図は硫酸イオンが存在する場合においては塩化物イオンと同様に変

化し、さらに pH が酸性域に存在する場合においては、中性域では不動態被膜で覆われるような自然電位においても鉄は腐食を生じると考えられる。

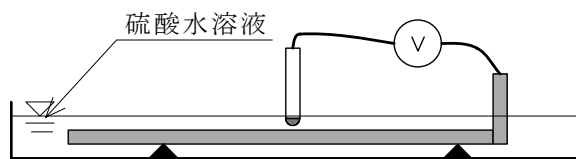


図 4.13 自然電位の測定概要

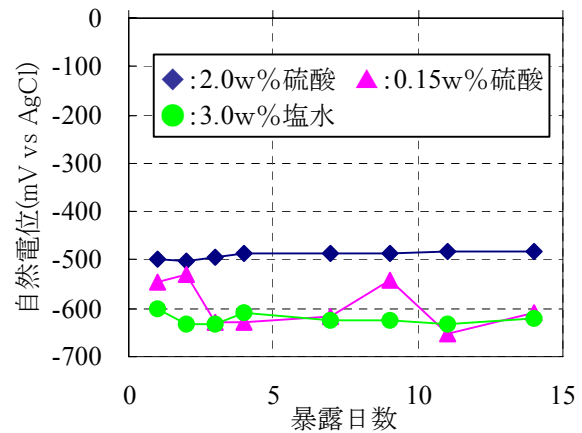


図 4.14 自然電位の経時変化
(浸せき鉄筋)

4.3.4 自然電位

各供試体の自然電位の経時変化および ASTM C 876¹⁾ 基準を図 4.15 に示す。塗りつぶしがコンクリート、白抜きがモルタルを示している。

硫酸水溶液環境下のコンクリートおよびモルタル両供試体については ASTM 基準における腐食領域に存在しているものはないが、測定時毎の変動が大きい。二水石膏の生成およびエトリンガイト生成による膨張を原因としてコンクリートおよびモルタル内部が粗な状態になっており、かぶりコンクリートが一様ではないために安定した値が得られていないと考えられる。硫酸イオンが鉄筋位置に到達した時点においては塩害の場合と同様の傾向を示すと考えられるが、硫酸によるコンクリートの侵食が進行し、4.3.2 および 4.3.3 に示すようにコンクリート中の pH は低下した時点においては、自然電位は貴変傾向を示すと推定されることから、硫酸を原因とする腐食鉄筋の自然電位については塩害とは異なった傾向を示すと考えられる。さらに、加えてかぶりコンクリート部の脆弱化による影響を合わせて検討を行う必要がある。

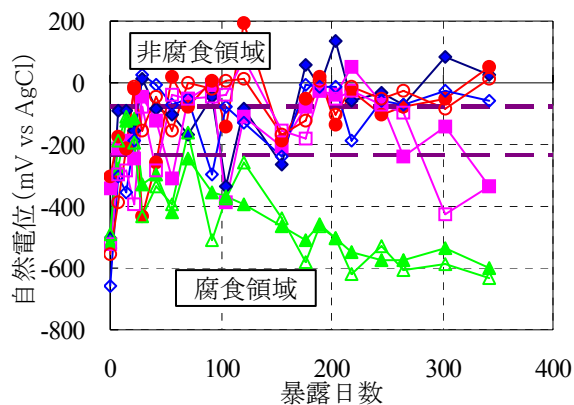
一方、塩水環境においては、明確に卑変傾向にあり、腐食領域に存在している。

4.3.5 分極抵抗逆数値（腐食速度指標）

各供試体の分極抵抗逆数値の経時変化および CEB⁷⁾ 基準を図 4.16 に示す。塗りつぶしがコンクリート、白抜きがモルタルを示している。

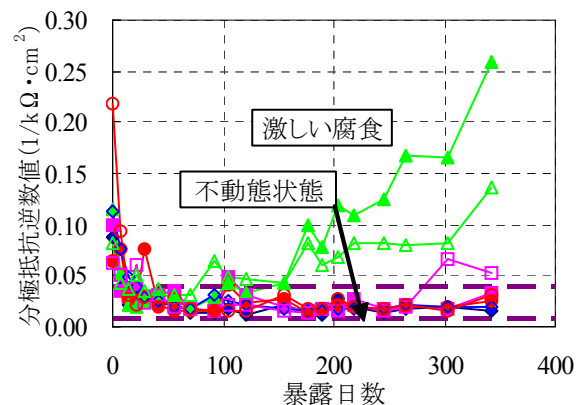
硫酸水溶液環境下の供試体においては、自然電位と同様に腐食傾向の値は示していない。硫酸水溶液環境下にある供試体の分極抵抗逆数値はほぼ一定であり、腐食状態を判断するのは困難である。

一方、塩水環境下の供試体においては暴露 150 日後から大きくなっており腐食が激しく進行している。



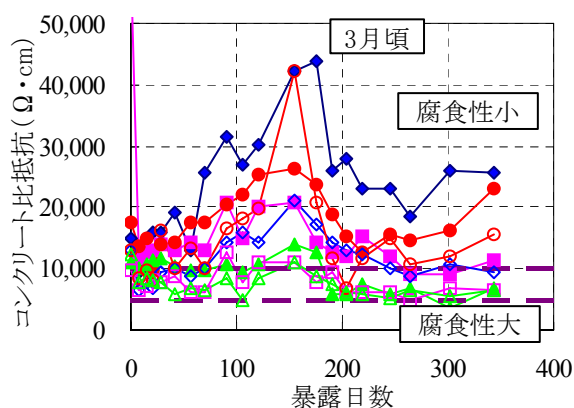
2.0w%硫酸乾湿: ◆ 2.0w%硫酸浸せき: ■
0.15w%硫酸乾湿: ● 3.0w%塩水乾湿: ▲

図 4.15 自然電位の経時変化



2.0w%硫酸乾湿: ◆ 2.0w%硫酸浸せき: ■
0.15w%硫酸乾湿: ● 3.0w%塩水乾湿: ▲

図 4.16 分極抵抗逆数値の経時変化



2.0w%硫酸乾湿: ◆ 2.0w%硫酸浸せき: ■
0.15w%硫酸乾湿: ● 3.0w%塩水乾湿: ▲

図 4.17 コンクリート比抵抗の経時変化

4.3.6 コンクリート比抵抗

各供試体のコンクリート比抵抗の経時変化および武若⁸⁾らの基準を図 4.17 に示す。塗りつぶしがコンクリート、白抜きがモルタルを示している。

塩水環境を除く全要因に関して、暴露 150 日目まではコンクリート比抵抗が増加する傾向にある。特に、2.0%硫酸水溶液乾湿繰返しのコンクリート供試体と 0.15%硫酸水溶液乾湿繰返しのコンクリート供試体が極めて高い値をとった。コンクリート比抵抗が増加した原因として、硫酸水溶液環境下のコンクリートおよびモルタルでは膨張生成物である二水石膏の生成やモルタル分の溶出が生じており、浸せき面側の表面付近に粗な部分が存在しているために比抵抗が増加したと考えられる。しかし、暴露 150 日以降は逆にコンクリート比抵抗は減少傾向に転じている。これは、4.3.2 の呈色試験では鉄筋位置までの硫酸イオンは確認されないという結果が得られたが、実際には骨材界面の遷移帯を通して試薬では検出されない程度の微量の硫酸が浸透しており、その影響で目視では確認できなかったがかぶりコンクリートに微小なひび割れが発生し、それを通じて電氣的に短絡する経路ができたためと考えられる。今後は、コンクリート抵抗が低下する原因および、それが自然電位・分極抵抗に与える影響についても検討を加える必要があると考えられる。

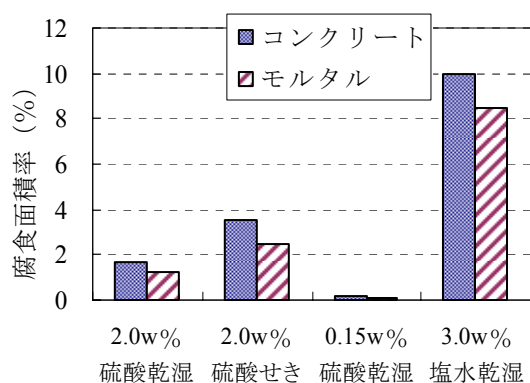
4.3.7 鉄筋の腐食状況

① 各供試体中の鉄筋の腐食面積率

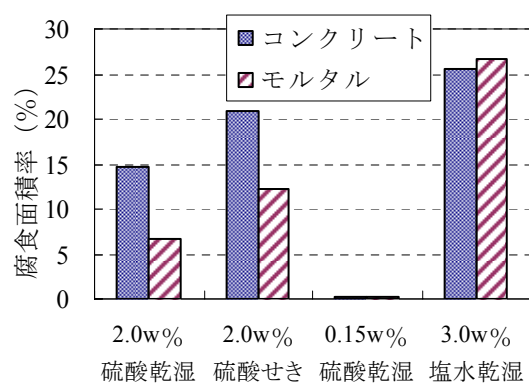
暴露 210 日目および 350 日目に各環境下のコンクリートおよびモルタル供試体内からはつり出した鉄筋の腐食面積率を図 4.18 に示す。

0.15w% 硫酸水溶液環境下においてはほとんど腐食は認められなかったが、2.0w% 硫酸水溶液環境下の供試体については明確な腐食発生が認められた。また、乾湿繰返しよりも浸せきの方が腐食面積率は大きい。これらのことから、4.3.2 の呈色試験では鉄筋位置までの硫酸イオンは確認されないという結果が得られたが、腐食の発生・進展において硫酸浸透が影響したと考えられる。

また、コンクリート内の鉄筋の方がモルタル内よりも腐食面積率が大きくなっていた。これは、粗骨材が剥落することで断面が急激に減少することが原因であると考えられる。



暴露 210 日目



暴露 350 日目

図 4.18 各供試体中の鉄筋の腐食面積率

4.3.8 中性化残りと腐食面積率の関係

暴露 350 日目のモルタル供試体において、フェノールフタレイン法による中性化残りおよびジメチルスルホナゾーⅢ水溶液による硫酸イオン未侵入部の厚さ（以下、硫酸イオン残り）と腐食面積率との関係を図 4.19 に示す。

中性化残りが小さいほど腐食面積率が大きく、硫酸イオン残りも同様の傾向である。硫酸侵食の場合も、 CO_2 による中性化の場合と同様に、非呈色深さよりも深部にまで劣化因子が浸透しているためと考えられる。

このため、腐食開始の判断は、変色フロントから鉄筋位置までの残りを基準として行うことができる。今回の実験の範囲では、画像処理の誤差を含めて腐食面積率が 1% 以上の場合を確実に腐食していると判断し、また、一般的な方法であるフェノールフタレイン法による中性化残りで評価を行うとすると、図 4.18 から 17mm 程度が腐食開始の限界値であると読み取れる。これはモルタルの場合であるが、 CO_2 による中性化の場合（塩分が含まれている場合で 25mm⁹⁾）よりも小さな値となった。硫酸の侵食作用が、 CO_2 の中性化作用より影響程度が大きいことを示していると考えられる。

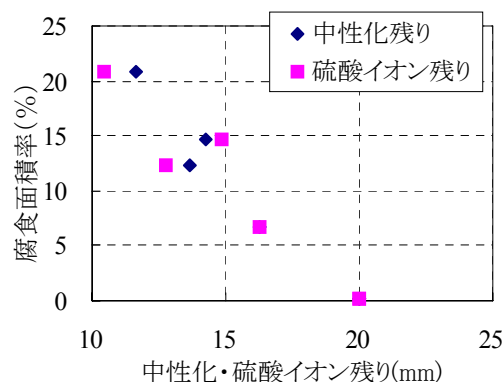


図 4.19 中性化残りと腐食面積率の関係（暴露 350 日目、モルタル供試体、硫酸環境下）

4.3.9 電気化学的鉄筋腐食モニタリングと腐食開始および進展の関係

2.0w% 硫酸水溶液環境下のコンクリート供試体中の腐食面積率の経時変化を図4.20に示す。塗りつぶしがコンクリート、白抜きがモルタルを示している。図中には、4.3.4 から 4.3.6 で示した自然電位および分極抵抗が腐食傾向を示した時点とコンクリート比抵抗が増加から減少に転じた時点を示している。

① コンクリート比抵抗と腐食開始

4.3.2 に示した呈色試験では、鉄筋位置までの硫酸イオンは確認されないという結果が得られたが、4.3.7 に示したように、暴露 210 日目の各供試体の鉄筋の腐食面積率の測定結果より、腐食が確認されている。また、4.3.6 に示したように、コンクリート比抵抗が増加から減少に転じた時期は暴露約 180 日目である。

このことから、かぶりコンクリート部に微小なひび割れが生じ電氣的に短絡することによって、コンクリート比抵抗の低下と同時期に腐食が開始したと推定される。したがって、コンクリートの比抵抗の経時変化を把握することにより、鉄筋の腐食の開始時期を判断できると考えられる。

② 自然電位・分極抵抗と腐食進展

自然電位が卑変し、分極抵抗が腐食傾向を示し始めたのは暴露 250 日目程度であり、暴露 350 日目での腐食面積率は 10% 以上である。このように ASTM 基準において自然電位および分極抵抗が腐食傾向を示した点ではすでに腐食が開始しており、コンクリート比抵抗の低下より遅れて感知されるものと考えられる。コンクリート比抵抗の低下は連続空隙の形成が原因であり、その結果として鉄筋の腐

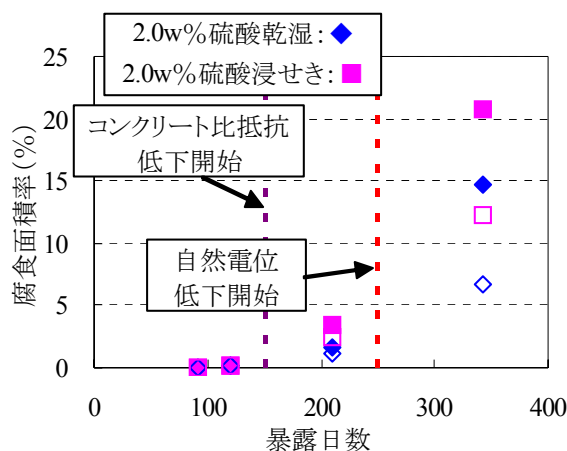


図 4.20 腐食面積率の経時変化

(コンクリート供試体、2.0w% 硫酸水溶液環境下)

食が開始したと考えられる。これに対して、自然電位および分極抵抗の変化は、硫酸の浸透により形成された連続空隙を通じて硫酸イオンおよび酸素が供給されたために腐食反応が激しくなり、自然電位および分極抵抗が腐食傾向を示したと考えられる。

4.3.10 硫酸侵食における鉄筋の腐食生成物

海岸大気中における鉄筋の腐食生成物に関しては、生成過程やその種類について明らかになっている部分も多く¹⁰⁾、その含有割合も示されている(表 4.4 参照)。

暴露 350 日目において、2.0w % 硫酸水溶液浸せきのモルタルおよびコンクリート供試体からはつり出した鉄筋の腐食生成物は、黒色のものが最も多く、その他黄あるいはオレンジ色のものも若干見られた。一方、塩水環境ではほぼすべてにおいて淡褐色あるいは褐色の腐食生成物が認められた。

表 4.4 鉄錆の種類と性質^{10)、11)}

化合物	色調	鉄錆の成分 (%)	
		SO ₄ ²⁻ 支配	Cl ⁻ 支配
FeO	黒	—	—
Fe ₃ O ₄	黒	0～20	10～85
α-FeOOH	褐色～黄	30～65	15～80
β-FeOOH	淡褐色～白	0	<30
γ-FeOOH	オレンジ	20～30	0～10
δ-FeOOH	褐色	—	—

硫酸環境では、黒錆である Fe₃O₄ が生成されたと考えられるが、塩害での腐食のように、その後の赤錆への化学反応は生じていない。また、硫酸イオンが浸透していたことにより、反応が SO₄²⁻ に支配されているオレンジ色の γ-FeOOH が生成されたと考えられる。硫酸と鉄の反応時に通常は生成される淡緑色の硫酸塩 FeSO₄ は認められなかったために、酸よりも pH の低下および硫酸イオンによって塩害の場合と同様の腐食反応が生じ、カソードにおいて生成された水酸化物イオンと反応したのと考えられる。さらに、コンクリート・モルタルの腐食が進行すると酸の影響により錆の生成過程および成分が変化するとも考えられ、さら

に検討が必要である。塩水環境については、黒錆はほとんど認められず、 Fe_3O_4 から褐色の $\alpha\text{-FeOOH}$ および $\beta\text{-FeOOH}$ に化学変化を生じたものと考えられる。

4.4 本章のまとめ

本章の範囲内で得られた結果を以下に示す。

(1)自然電位による腐食の判断については、無混和のコンクリートに対しては ASTM 基準が適用できるという結果が得られたが、高炉スラグ微粉末に対しては、腐食していないにも関わらず自然電位が -300mV と卑な値を示すことから、ASTM 基準による腐食の判断は困難であると考えられる。

(2)分極抵抗逆数の積分値による腐食程度の把握については、無混和、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末混和のコンクリートによらず、同様の傾向を示しており、混和材の有無によらない腐食程度のある程度の把握が可能であると考えられる。

(3)硫酸侵食では、フェノールフタレイン法により得られる中性化深さよりも深部にまで硫酸イオンは浸透している。したがって、硫酸侵食を受ける場合の鉄筋腐食の発生・進展においては、pH の低下による影響のみでなく、硫酸イオンが与える影響も併せて検討する必要がある。

(4)硫酸侵食の場合では、中性化残りや硫酸イオン残りで腐食開始を判断することができる。一般的な方法であるフェノールフタレイン法による中性化残りで評価すると、本実験で用いたモルタルの場合では、 17mm 程度が腐食開始の限界値であった。

(5)硫酸侵食に対する鉄筋腐食モニタリングに関して、生じるカソード反応が塩害の場合とは異なっているために、鉄筋の自然電位は塩害の場合に比べて約 100mV 貴な値が示されることが考えられる。

(6)コンクリートの比抵抗が増加から減少に転じる時点により、腐食の開始時期を判断できると考えられる。また、腐食がさらに進展した段階を示す指標として自然電位および分極抵抗により判断できるが、判断基準については検討が必要である。

参考文献

- 1) ASTM C 876 : Half cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete、1977
- 2) 川東龍夫：過酷環境下におけるコンクリート構造物の劣化過程および耐久性評価に関する研究、京都大学学位論文、2001
- 3) 蔵重勲、魚本健人：硫酸腐食環境におけるコンクリートの劣化特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.1、pp241-246、2000
- 4) 日本化学会：化学便覧（基礎編Ⅱ）、丸善、1973
- 5) 白勢和道ほか：硫酸侵食された鉄筋コンクリートの性状に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp1005-1010、2004
- 6) 防錆・防食技術総覧編集委員会編：防錆・防食技術総覧、2000
- 7) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion BBRI-CSTC-WTCB, 1997
- 8) 武若耕司ほか：コンクリート中の鉄筋腐食性状の非破壊検査方法に関する実験的検討、第13回セメント・コンクリート研究討論会講演要旨、1986
- 9) コンクリート標準示方書[維持管理編]、土木学会、2001
- 10) 須田久美子、S.Misra、本橋賢一：腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.14、No.1、pp751-756、1992
- 11) 三沢俊平：さびの腐食科学、防食技術、37-8、1988

第 5 章 分布を考慮に入れた塩分浸透性および鉄筋腐食性状の評価

5.1 はじめに

第 5 章では、高流動コンクリートおよび普通コンクリートについて塩分浸透性、電気化学的な非破壊検査手法である自然電位、分極抵抗の測定値および鉄筋の腐食性状の分布性状に関して検討を行った。また、これらの分布が互いにどのような関係があるのかについて把握し、塩分浸透量および自然電位、分極抵抗が鉄筋の腐食面積率に与える影響について検討を行った。この検討結果から分布が小さく点検が容易なコンクリートに関しての評価を行った。

5.2 鉄筋腐食に関する各劣化指標の分布

5.2.1 実験概要

①コンクリートの配合

コンクリートとしては、通常程度のスランプ性状を持った普通コンクリートおよび締固め不要である高流動コンクリートを用いた。また、防食効果があり海洋環境における耐久性向上に効果があるとされる¹⁾ シリカフューム、または水密性および化学抵抗性の向上に効果があるとされている²⁾ 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの浸透性状についてもあわせて検討を行うこととした。混和材はセメント置換とし、置換率については既往の研究から高炉スラグ微粉末については 60%、シリカフュームについては 10%とした。水結合材比については、塩分の浸透が十分に考えられる 60%および海洋環境での構造物における基準に基づいて 40%の 2 種類とした。また、比較用に無混和の普通コンクリートも作成した。

表5.1 示方配合

	SLまたは SF(cm)	W/B (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						B×%(cc/m ³)		W×%(g/m ³)
				W	B			S	G	AE減水 剤	AE助剤	増粘剤
					C	SF ^{*1}	SG ^{*2}					
普通 コンクリート	9±1	40	48	170	425	0	0	821	910	0.25	0.2	-
		170		283	0	0	870	950	0.25	0.2	-	
		175		117	0	175	841	933	1.6	0.3	-	
		175		263	29	0	865	955	0.25 ^{*3}	0.3	-	
高流動 コンクリート	55±5	60	48	175	117	0	175	841	933	1.8 ^{*3}	0.5	0.15
				175	263	29	0	865	955	3.7 ^{*3}	0.5	-

*1:シリカフューム

*2:高炉スラグ微粉末

*3:高性能AE減水剤を使用

用いた5種類の示方配合を表5.1に示す。なお、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートに関しては、材料分離抵抗性を得るために増粘剤を用いた。

② 供試体の作成

セメントは普通ポルトランドセメント、シリカフュームは比重2.20、比表面積200,000cm²/gの粉体状のもの、高炉スラグ微粉末は比重2.88、比表面積4,080 cm²/gのもの、細骨材は滋賀県野洲川産川砂（比重2.55、F.M.2.49）、粗骨材は滋賀県土山産砕石（比重2.61、最大寸法15mm）を使用した。供試体は100×200×1600mmの梁型供試体とし、長さ1500mm鉄筋（D10）の端部を研磨後、長さ500mmの絶縁被覆つきコードをハンダ付けし、この部分を自己融着テープとエポキシ樹脂で被覆したもの4本を図5.1に示すように配置した。

③ 養生および環境条件

供試体は材齢1日で脱型を行い、材齢28日まで散水養生を行った。養生終了後、室内で毎日1回ずつ塩分濃度5%（Cl⁻換算）の塩水を散水し、乾湿繰返し条件となるようにして腐食を促進させた。

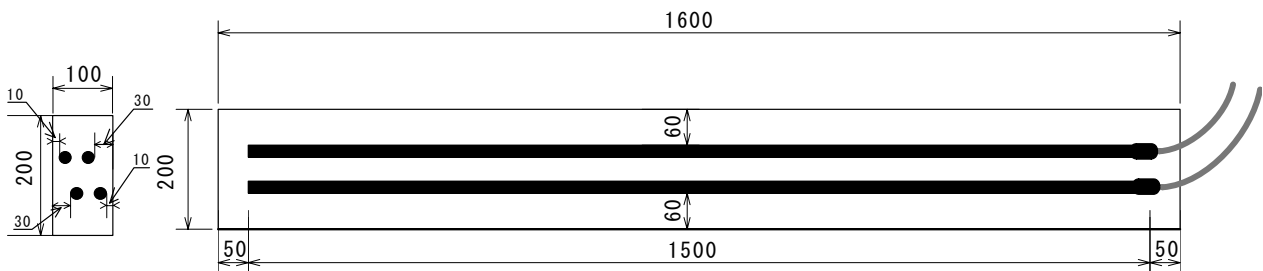


図 5.1 供試体図 （単位：mm）

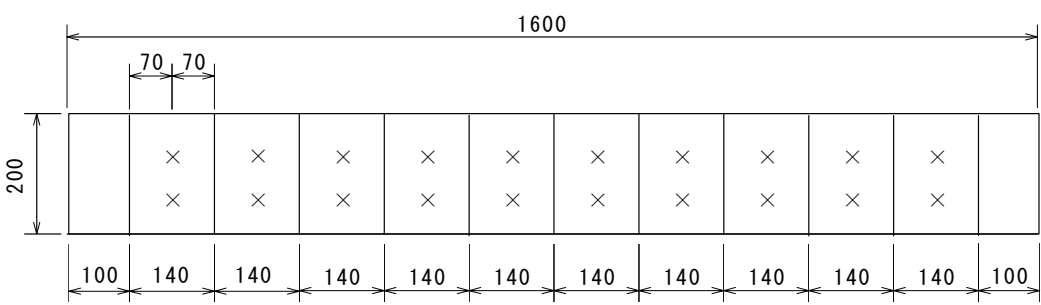


図 5.2 測定位置 （単位：mm）

④測定項目

所定の暴露経過後において、図5.2に示すように両端100mmを除いて、コンクリートカッターを用いて140mmの等間隔に供試体を切断(1本の鉄筋につき計10切断片)し、さらに表裏から深さ方向に切断して測定用試料を作成した。深さ方向については、鉄筋表面位置である5～15mm区間、(以下10mm) および25～35mm区間(以下30mm)において塩分量の測定を行った。試料は1箇所の所定の深さについて2個作成し、結果は平均した。このように作成した試料に対して、塩化物イオン選択性電極を用いた方法(JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」)に従って、全塩分量の測定を行った。さらに、コンクリート中に埋設した鉄筋に対しては、自然電位および分極抵抗を定期的に測定した。照合電極には飽和銀塩化銀電極(Ag/AgCl)を用い、腐食状況がある程度局部的に得られる交流インピーダンス法(交流電圧: $\pm 10\text{mVp-p}$ 、周波数: 10Hzから20mHz、ステンレス製円盤からなる径4cmの対極および径11cmード対極を用いた2重対極方式、D10に対して被測定面積 6.2cm^2)を用いて行った。測定は、図5.2に示すように1本の鉄筋につき10点(鉄筋直上)の両側面において行った。

また、腐食面積率については、図5.2に示す140mm毎に切断し、はつりだした鉄筋の表面画像を取り込み、色差による画像処理を行い、目視による判定と合わせて測定を行った。

5.2.2 コンクリート中の全塩分量の分布

暴露開始2年後における深さ10mmおよび30mmでの全塩分量の平均値および変動係数を図5.3および図5.4に示す。SFはシリカフューム、SGは高炉スラグ微粉末を示している。

平均値に関しては、深さ10mmでは、水セメント比40%が最も小さく、水結合材比60%のコンクリートを比較すると高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを混和した方が若干小さな値を示している。また、フレッシュ性状については高流動コンクリートの方が普通コンクリートよりも塩分浸透量は大きくなった。これは第3章で得られた結果と同様であった。一方、深さ30mmでは、全塩分量の平均値は、同水結合材比において高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを混和することあるいは低水セメント比にすることにより小さくなっている。深さ10mmでは多量の塩分がすでに浸透し、飽和状態に達しているために同程度の結果となったが、

深さ30mmのような深部では、混和材を用いることによって無混和のコンクリートと比べて組織が緻密となるため、同水結合材比であっても塩分浸透抑制効果が高いと考えられる。また、高流動コンクリートは普通コンクリートより全塩分量の平均値が小さくなっていることから、高流動コンクリートはさらに細孔組織が緻密となっており³⁾、浸透抑制効果に優れていると考えられる。

一方、変動係数に関しては、深さ10mmでは、同水結合材比においてはシリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和することによって、変動係数が若干低減されている。また、高流動コンクリートの方が普通コンクリートに比べて変動係数が若干小さくなっている。深さ30mmでは、無混和のコンクリートに比べて混和材を用いたコンクリートの方が変動係数は半分程度に抑制されている。さらに、いずれの混和材を用いたコンクリートにおいても、高流動コンクリートの方が普通コンクリートよりも小さい。深さ10mmでは平均値と同様に塩分浸透量が多いために変動係数、つまりばらつきも小さくなっているが、浸透量が少ない深さ30mmではコンクリートによる差が明確に認められた。普通コンクリートにおいては、振動締固めによって通常は問題とならない程度の若干の材料分離を生じたこと、あるいは場所において締固め度合いに差が生じたために塩分浸透量のばらつきが大きくなったものと考えられる。しかし、流動性に優れており、締固め不要の高流動コンクリートを用いることで、このようなばらつきを低減でき、より一様で均一なコンクリートが形成されていると考えられ、塩分浸透量についてもばらつきが低

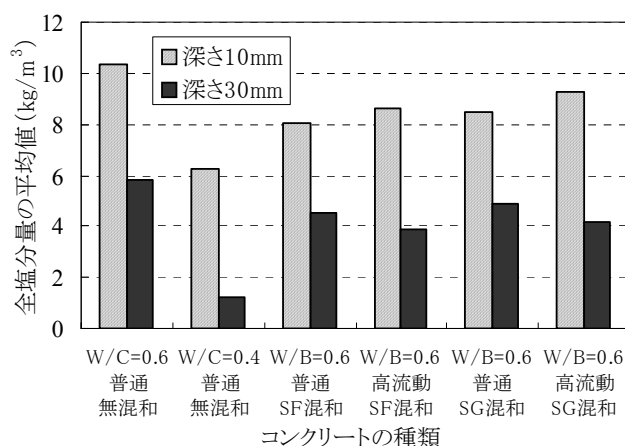


図 5.3 各コンクリートの全塩分量の平均値

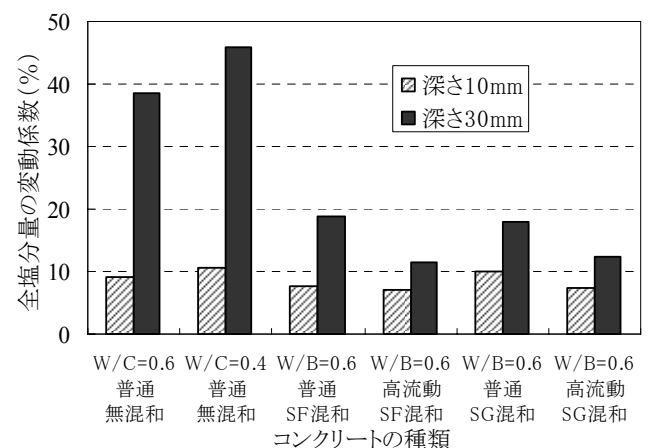


図 5.4 各コンクリートの全塩分量の変動係数

減されたものと考えられる。

5.2.3 コンクリート中の鉄筋の腐食面積率の分布

暴露開始2年後における深さ10mmおよび30mmでの同一供試体での腐食面積率の平均値および変動係数を図5.5および図5.6に示す。SFはシリカフューム、SGは高炉スラグ微粉末を示している。

腐食面積率の平均値に関しては、かぶり10mmの鉄筋では無混和（W/C=60%）のコンクリートと高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートが同程度で大きく、シリカフューム混和、そして無混和（W/C=40%）が最も小さかった。シリカフュームと高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの全塩分量はほぼ同様であるが、高炉スラグ微粉末混和のコンクリート中の鉄筋の方が腐食面積率が大きくなっている。これは、全塩分量も多量になり、腐食面積率が20%を超えると、混和材による水酸化イオンの消費によるpHの低下が大きく影響したものと考えられる。これに対してかぶり30mmの鉄筋では無混和（W/C=60%）と比べて混和材を用いたコンクリートの方が、腐食面積率は小さくなった。これはほぼ全塩分量の傾向と同様の結果であり、腐食面積率が10%程度の段階では混和材の有無に関係なく全塩分量に影響を受けているものと考えられる。

一方、コンクリートの流動性に関しては、いずれの混和材を用いたコンクリートにおいても、高流動コンクリートの方が普通コンクリートに比べて腐食面積率の標準偏差は小さくなるという結果が得られた。5.2.2で述べたように高流動コンクリートのように流動性が向上することで、打設時におけるコンクリートの不均一性が低減でき、一様に塩分の浸透が生じる。それにより、特定の部分で腐食が

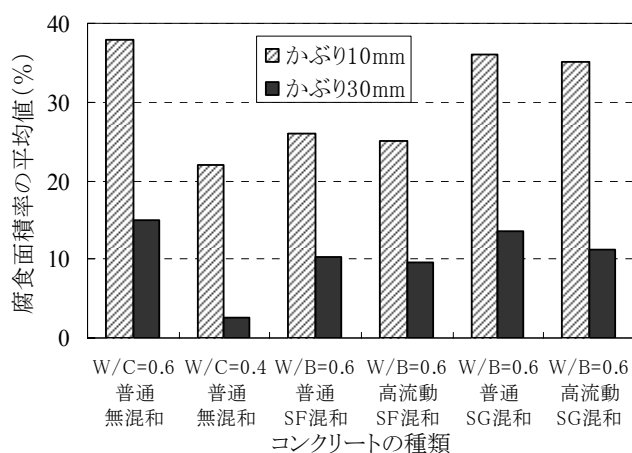


図 5.5 各コンクリートの腐食面積率の
平均値

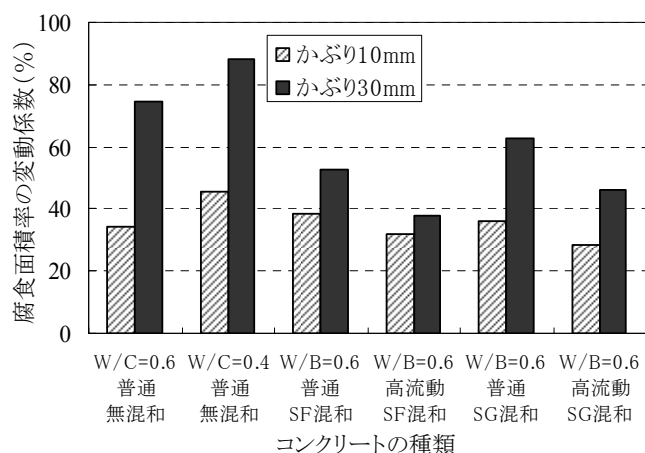


図 5.6 各コンクリートの腐食面積率の
変動係数

進行するマクロセル的腐食電池の形成を低減できると推定されるが、今回の実験においてはこの効果の影響を確認できたものと考えられる。

5.2.4 鉄筋の自然電位および分極抵抗の分布

暴露開始2年後における同一供試体でのかぶり10mmおよび30mmの鉄筋の自然電位および分極抵抗の平均値を表5.2に示し、また両者の変動係数を図5.7に示す。SFはシリカフューム、SGは高炉スラグ微粉末を示している。

表5.2に示すように、自然電位については、かぶりによる差は水セメント比が40%を除いて同様の値を示した。今回の実験においては、酸素の供給量に律速されることによって腐食の進行度に関係なく-500mV程度まで卑変すると腐食電位はこれ以上は大きくなり、一定の値となるものと考えられる。これに対して、分極抵抗はかぶりによる差が自然電位と比べて明白に認められ、塩分浸透量から推定される腐食の進行速度によった結果が得られていると考えられる。さらに、塩分が多量に存在している状態では、自然電位および分極抵抗の両者ともシリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和することによる差異があまりみられず、同様の値であった。

一方、図5.7より変動係数に関しては、自然電位は分極抵抗の変動係数に比べてきわめて小さく、また鉄筋のかぶりにかかわらず、すべてのコンクリートでほぼ同様の値となっている。これは、鉄筋の一部が腐食し卑な傾向を示すと、非腐食

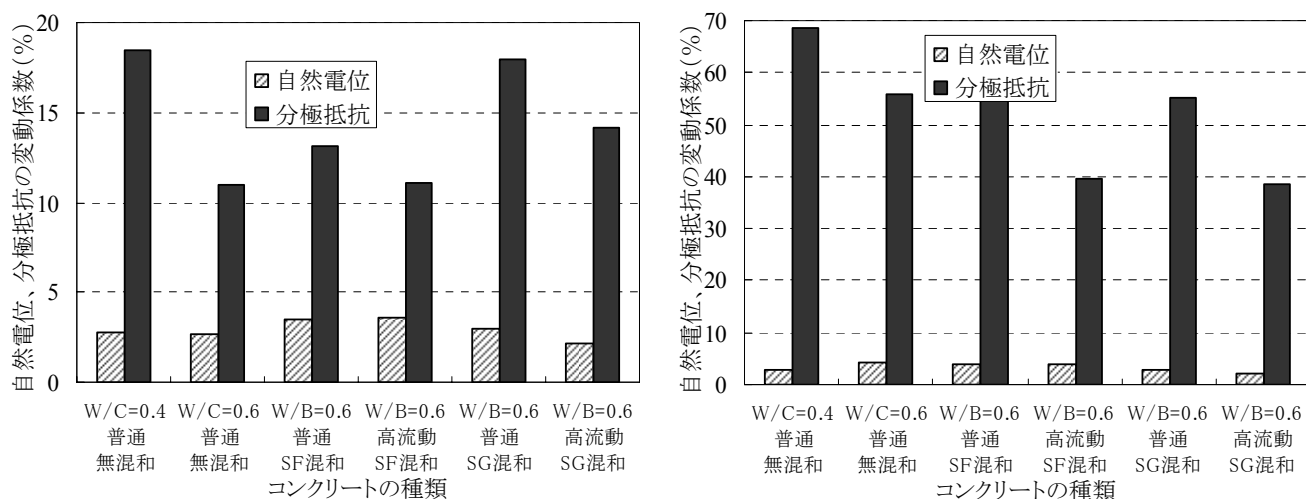
表 5.2 各供試体の自然電位および分極抵抗の平均値

	自然電位 (mV vs AgCl)		分極抵抗 (kΩ・cm)	
	10mm	30mm	10mm	30mm
無混和(普通 60%)	-505	-486	10.5	16.3
無混和(普通 40%)	-485	-298	15.2	50.1
シリカフューム混和(高流動)	498	-468	14.5	18.4
シリカフューム混和(普通)	-485	-455	12.3	14.2
高炉スラグ混和(高流動)	-512	-502	11.8	20.2
高炉スラグ混和(普通)	-509	-512	10.3	18.5

部が分極され、同一の鉄筋に対して測定した10点の自然電位が平均化する傾向にあり、さらに酸素が供給されている条件では自然電位に下限値が存在するためと考えられる。したがって、自然電位より腐食の位置について判定を正確に行うこと、あるいは自然電位を用いることによって各測定点での腐食状況の大小を正確に把握することは困難であると考えられる。

これに対して、分極抵抗はかぶり10mmの方が30mmよりも変動係数は大きくなっている。これは、ほぼ全範囲にわたって腐食が生じているために各測定点における分極抵抗は小さくなり、同一のかぶりにおける分極抵抗の変動係数が小さくなったと考えられる。また、コンクリートの種類については、普通コンクリートの方が高流動コンクリートに比べて大きくなっており、腐食面積率と同様の傾向を示している。2重対極を用いて得られた分極抵抗はセンサー直下付近の腐食状況を表しているといわれているが、鉄筋腐食のばらつきに関してはよく表現していると考えられる。しかし、その腐食状況を表している範囲の特定や電流の流れなど未解明な部分も多く今後の検討が必要である。

自然電位により腐食の開始を判定し、腐食したと判断された鉄筋に対しては分極抵抗を併用して鉄筋腐食の判断をすることにより正確な判断が可能となり、局部的な腐食の検査にも適用できると考えられる。



(1) かぶり 10mm

(2) かぶり 30mm

図 5.7 自然電位および分極抵抗の変動係数

5.2.5 供試体中の塩分量の分布形状

コンクリート中の塩分量の測定結果について確率分布で表したものを図5.8に示す（暴露2年後、かぶり30mmで測定）。

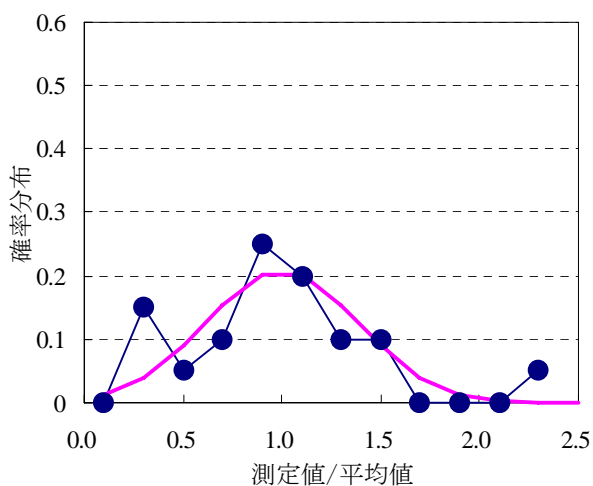
個々の供試体により平均値が異なっているために、今回は各測定値を平均値で除して正規化した値を一定の範囲ごとに度数を求めて確率分布により表示したものを用いた。また、各図中には実験より得られた変動係数に基づいて分布が正規分布に従うと仮定して得られた計算値についても同時に示している。W/C=40%のコンクリートを除いて、測定値の分布と正規分布に従うとして算出された値とほぼ同様の形状を示していることから、全塩分量の分布に関しては正規分布に従うものと考えられる。変動係数が大きな普通コンクリートでは、水セメント比にかかわらずグラフは平均値の0.3から1.7までの範囲にわたって分布しており平均値付近が最も大きく、平均から離れるにしたがって徐々に減少するような、なだらかな正規分布の形状をしている。これに対して、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末を混和した普通コンクリートでは、グラフは平均値の0.7から1.3までと無混和のコンクリートに比べて、より尖った形状になっており、ばらつきが小さいことを示している。

分布形状からも無混和の普通コンクリート、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末を混和した普通コンクリート、高流動コンクリートの順に塩分浸透性に関して一様なコンクリートが形成されていると考えられる。

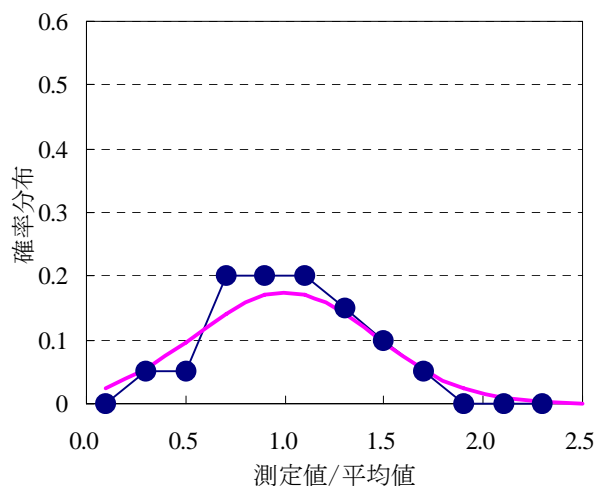
5.2.6 供試体中の腐食面積率の分布形状

鉄筋の腐食面積率の測定結果について確率分布で表したものを図5.9に示す（暴露2年後、かぶり10mmで測定）。また、各図中には実験より得られた変動係数に基づいて分布が正規分布に従うと仮定して得られた計算値についても同時に示している。

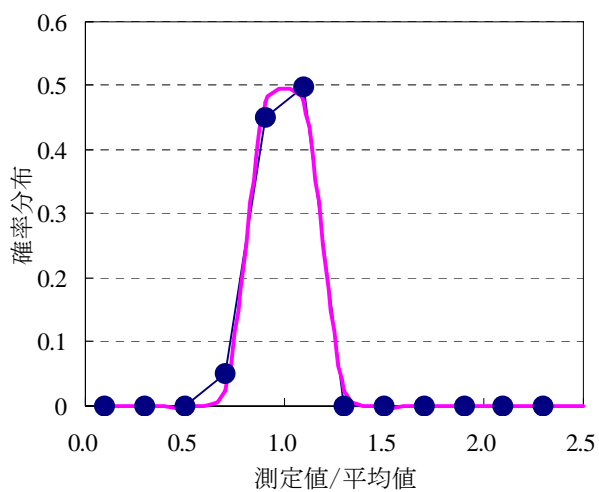
各コンクリートにおける腐食面積率の分布形状は、塩分量に比べてなだらかな形状となっており、計算値ともあまり一致していない。しかし、多くのコンクリートにおいて、平均値付近の確率が最も大きくなっており、ばらつきの傾向としては、塩分量の場合と同様に普通コンクリート、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末を混和した普通コンクリート、高流動コンクリートの順にばらつきは小さくなっている。鉄筋の腐食は塩分量だけではなく、鉄筋とコンクリートと



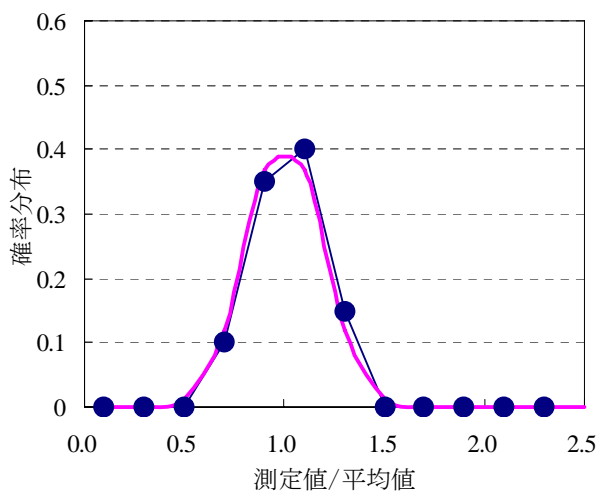
(1) W/C=40%、無混和、普通



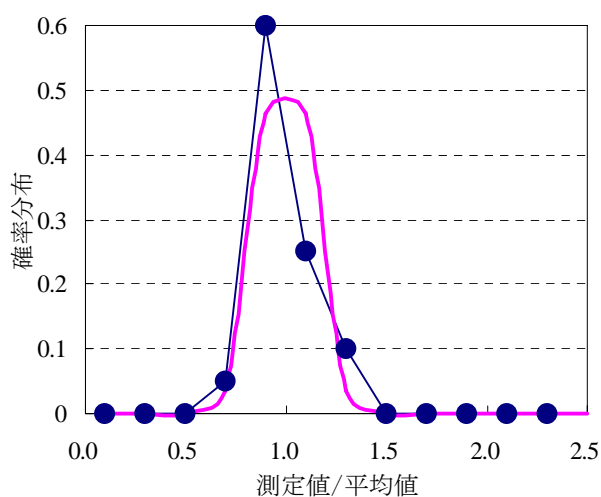
(2) W/C=60%、無混和、普通



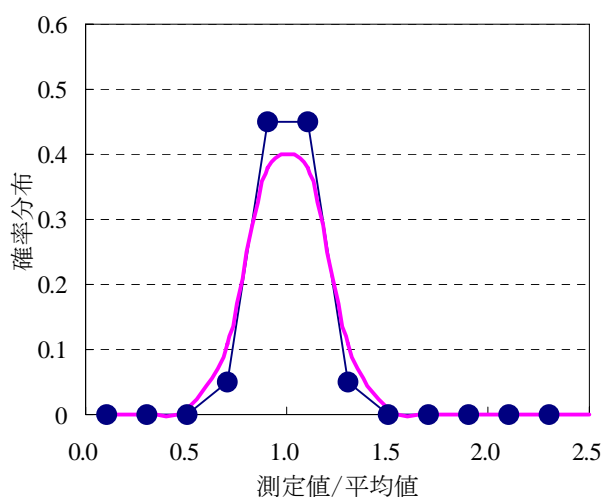
(3) W/B=60%、シリカフューム混和、高流動



(4) W/B=60%、シリカフューム混和、普通

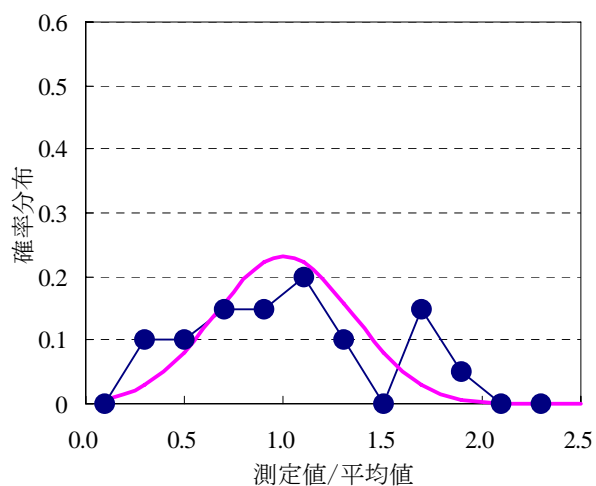


(5) W/B=60%、高炉スラグ微粉末混和、高流動

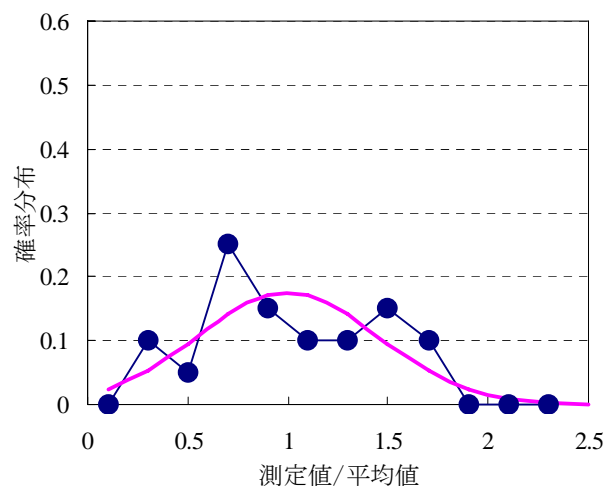


(6) W/B=60%、高炉スラグ微粉末混和、普通

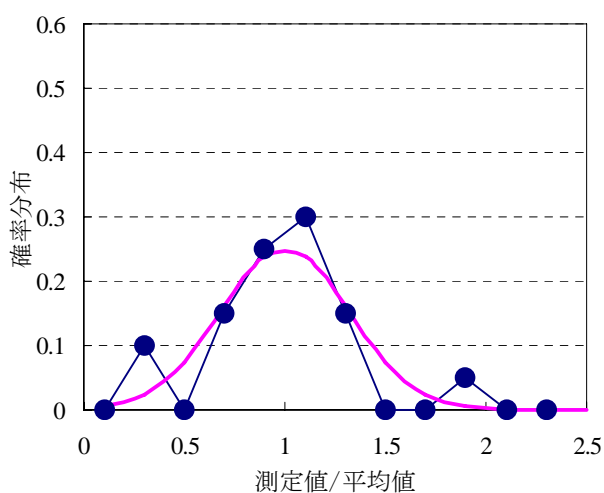
図 5.8 全塩分量の度数分布



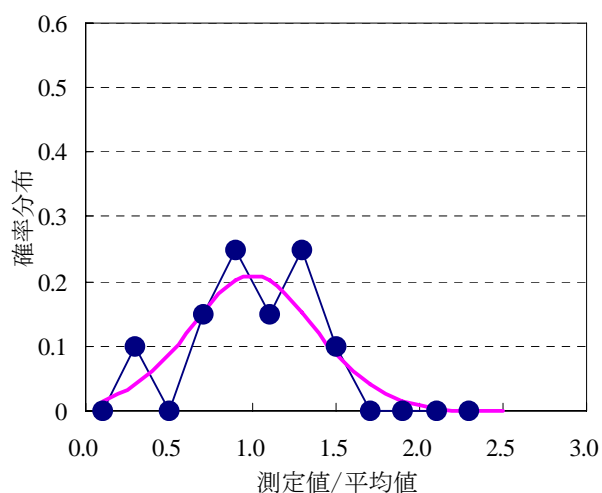
(1) W/C=40%、無混和、普通



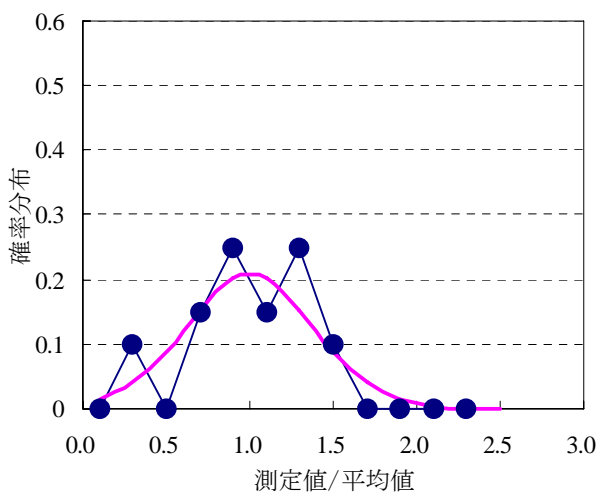
(2) W/C=60%、無混和、普通



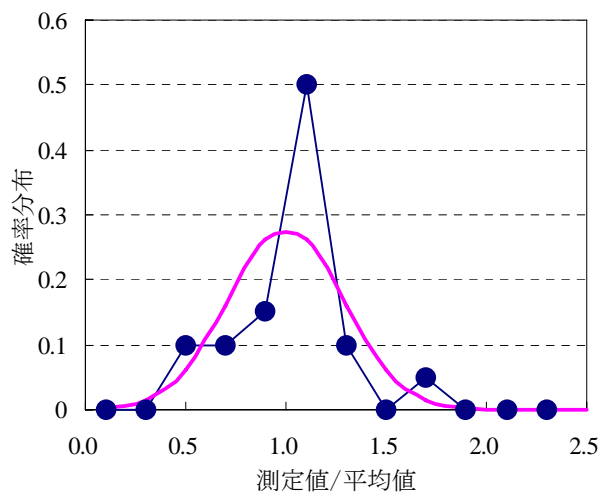
(3) W/B=60%、シリカフューム混和、高流動



(4) W/B=60%、シリカフューム混和、普通



(5) W/B=60%、高炉スラグ微粉末混和、高流動



(6) W/B=60%、高炉スラグ微粉末混和、普通

図 5.9 腐食面積率の度数分布

の界面の状態や打設時に形成された空隙の影響、あるいは水分および酸素の供給についても影響を受けているために、塩分量ほどの明確な傾向は見られなかったものと考えられる。

5.3 腐食面積率と塩分量の関係

5.3.1 各種混和材の影響

暴露開始 6 ヶ月後および 2 年後における腐食面積率と深さ 10mm および 30mm での全塩分量の関係をそれぞれ図 5.10 および図 5.11 に示す。

6 ヶ月後の結果（図 5.10）より、全塩分量が 3.0kg/m^3 以下では、全塩分量が大きくなると腐食面積率の最大値も大きくなっており、 2.5kg/m^3 以上においても全塩分量が大きくなると腐食面積率が若干大きくなっているもののその傾きは小さくなっている。つまり、ある一定量の塩分が存在すれば、塩分量とはあまり相関を持たずに腐食は進行し、腐食面積率は大きくなっている。塩化物イオンは鉄筋の不動態被膜を破壊するため、腐食が開始する初期段階においては相関があるが、腐食が進行すると全塩分量との相関は小さくなったものと考えられる。

また、シリカフュームを混和したものについては、全塩分量が 5.0kg/m^3 以上において同一の全塩分量でも腐食面積率は無混和のものと比べて小さく、シリカフュームによる腐食抑制効果があると考えられる。今回は全塩分量を用いているため、シリカフュームがもつ塩分の固定化能力が原因かは判断できないが、一つの要因である可能性が考えられる。

一方、2 年後の結果（図 5.11）より、一部には 1 年後の結果よりも小さくなっているものも見られるが、無混和のコンクリートについては、全塩分量が多くなると腐食面積率も大きくなる傾向にある。一方、シリカフューム高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、全塩分量が 10kg/m^3 を超えると混和材を用いたコンクリートはほぼ一定の腐食面積率になっている。また 10kg/m^3 以上では、同じ全塩分量でも無混和の腐食面積率に比べて、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートが同程度か若干小さく、シリカフュームではさらに小さくなっている。高炉スラグ微粉末には塩分の固定化する能力に優れているとされているが⁴⁾、第 3 章の全塩分量と固定塩分量の結合材重量比の関係（図 3.4）に示すように全塩分量が多量に含まれている状態では腐食に影響をおよぼす塩分量を抑制する効果が期待できるが、少量ではあまり効果は得られないものと考えられる。シリカフュー

ームについても腐食抑制効果があり、塩分浸透を抑制するだけではなく、塩分が存在する場合においても効果が期待できるものと考えられる。

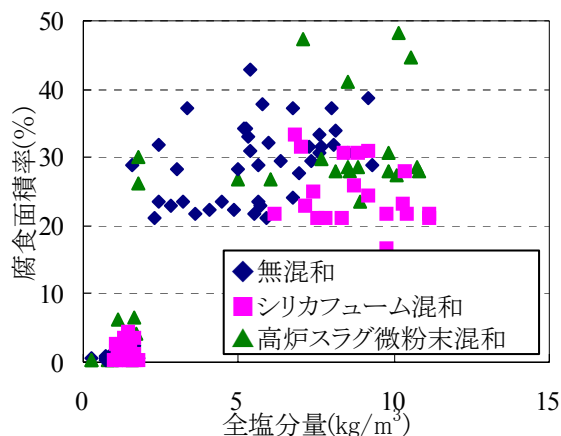


図 5.10 全塩分量と腐食面積率
(暴露 6 ヶ月後)

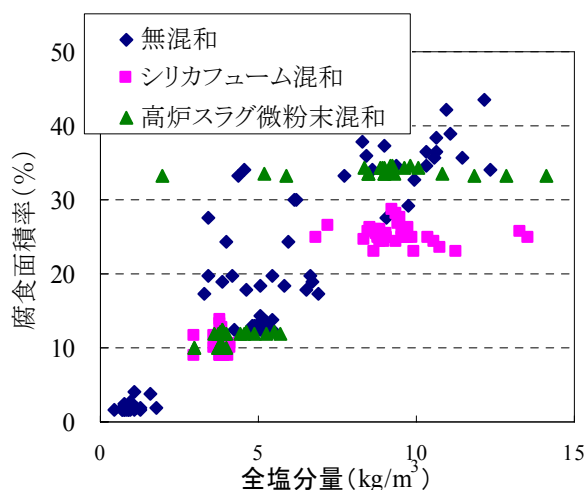


図 5.11 全塩分量と腐食面積率
(暴露 2 年後)

5.3.2 腐食発生限界量

① 腐食発生面積率からの検討

腐食発生面積率と全塩分量の関係から腐食発生限界量を検討するために、図 5.11 の全塩分量が 2.0 kg/m^3 以下の部分を拡大して図 5.12 に示す。1% 以下では、腐食発生を目視で正確には判断できなかったために、腐食発生面積率が 1% 程度を腐食・非腐食の境界とすると腐食発生限界量は $1.0 \sim 1.5 \text{ kg/m}^3$ の範囲にある。腐食が大きいものもこの全塩分量以上の領域

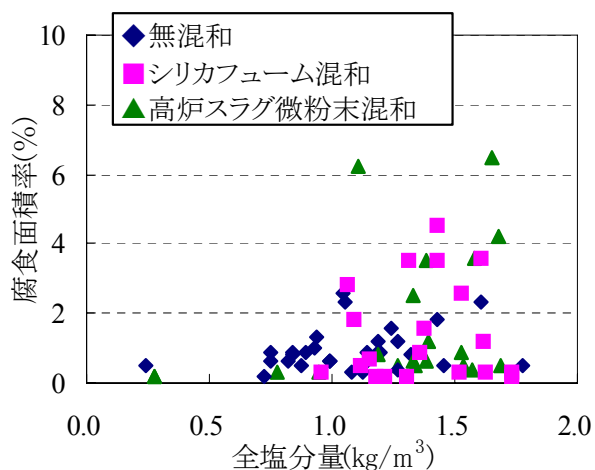


図 5.12 全塩分量と腐食面積率

にある。一般に腐食発生限界量は 1.2 kg/m^3 といわれている⁵⁾。腐食発生限界量は温度や酸素の供給に影響されると指摘されており、また内在塩分と外部からの塩分浸透とは異なるとも考えられるが、 1.2 kg/m^3 は妥当であると考えられる。しかし、ばらつきが大きいので、より多くのデータが必要である。

②腐食発生確率からの検討

同一の鉄筋に対して全測定点10箇所中、鉄筋の腐食が認められた箇所数の割合をその鉄筋における腐食発生確率と定義し、鉄筋表面位置における全塩分量と腐食発生確率の関係を図5.13に示す。なお、今回の実験の範囲では、画像処理の誤差を含めて目視による判断も含めて腐食面積率が1.0%を腐食・非腐食の境界としている。シリカフューム、高炉スラグ微粉末の混和材の使用の有無および普通、高流動コンクリートによらず同様の傾向を示しており、全塩分量が 1.0kg/m^3 以下では腐食発生確率は0で腐食は認められなかったが、全塩分量が 1.0kg/m^3 以上では全塩分量が大きくなるほど腐食発生確率も大きくなる傾向にあり、全塩分量が 3.0kg/m^3 以上では腐食発生確率は1に近い値となり、測定箇所全てにおいて腐食が認められている。腐食発生確率と全塩分量の関係より、腐食発生限界量は腐食発生確率が0から1に移行する間にあるとすると、今回の実験においては示方書に規定されている $1.2\sim 2.5\text{kg/m}^3$ の範囲にあると考えられる。

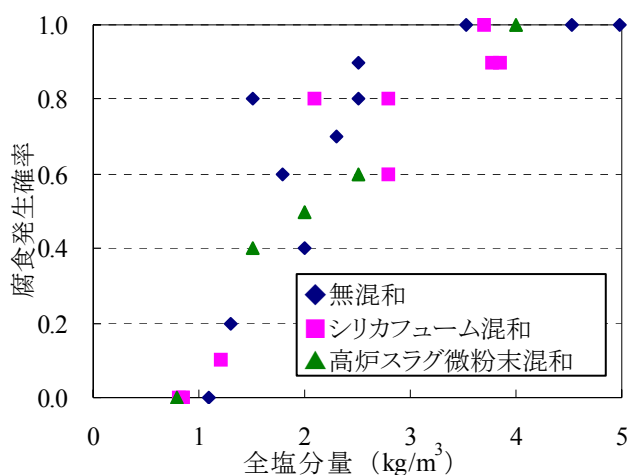


図 5.13 全塩分量と腐食発生確率
(暴露 6 ヶ月および 1 年後)

5.4 腐食面積率とひび割れ発生確率の関係

同一の鉄筋に対して全測定点10箇所中、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れが目視で認められた箇所数の割合をその鉄筋におけるひび割れ発生確率と定義し、腐食面積率とひび割れ発生確率の関係を図5.14に示す。ばらつきは大きいものの腐食面積率が高いほど、ひび割れ発生確率も大きくなる傾向が認められた。

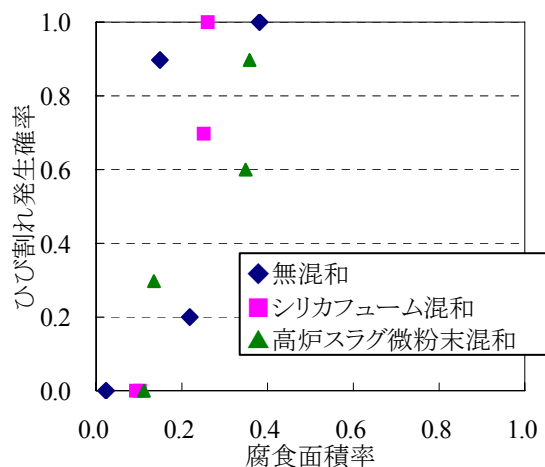


図 5.14 腐食面積率とひび割れ発生確率
(暴露 6 ヶ月および 1 年後、かぶり 10mm)

腐食面積率が0.3より大きくなるとひび割れ発生確率が大きくなっており、0.3を境界としてひび割れ発生の傾向が異なっていると考えられる。

5.5 各劣化指標の分布の相関関係

5.5.1 全塩分量の変動係数が与える影響

暴露開始後2年におけるかぶり10mmおよび30mmについて、全塩分量の変動係数と鉄筋腐食の変動係数との関係を図5.15に示す。

かぶり10mmでは変動係数が小さいために自然電位および分極抵抗と全塩分量との間には明確な傾向は認められないが、腐食面積率については全塩分量の変動係数が大きいほど腐食面積率の変動係数も大きくなっている。さらに、その傾きも大きいことから、腐食が進行した段階では、全塩分量のばらつきに大きく影響を受けていると考えられる。

また、かぶり30mmでは、全塩分量の変動係数が大きくなると腐食面積率および分極抵抗の変動係数は大きくなる傾向にある。これに対して、自然電位は全塩分量の変動係数によらずほぼ一定の値であり、同一の鉄筋では同様の値を示すことから、局所的な腐食状態を反映してはいないと考えられる。また、全塩分量の変動係数と腐食面積率および分極抵抗の変動係数の関係より、分極抵抗の変動係数が大きくなると腐食面積率の変動係数も大きくなっている。つまり、コンクリート中を浸透する塩分量のばらつきが大きくなると、それに起因する鉄筋腐食性状（分極抵抗および腐食面積率）のばらつきも大きくなり、腐食面積率については相関がより強い傾向を示すことが考えられる。高流動コンクリートとすることで細孔構造の緻密性およびコンクリートの均一性を向上させることは、塩分の浸透性および全塩分量・腐食面積率のばらつきを低減でき、孔食などの局部的な腐食の抑制および点検箇所数の削減などが期待でき、維持管理性も含めた総合的な塩害に対する耐久性の向上につながると考えられる。

一方、非破壊的なモニタリング指標である分極抵抗の分布に関しては、全塩分量の分布ほどの明確ではないが全塩分量の変動係数が大きいほど分極抵抗の変動係数も大きくなっている。分極抵抗の値はかぶりコンクリートの含水状態による測定値の変化および測定範囲などの問題点が存在しているために、それらの影響を排除した分極抵抗の測定手法の確立が必要であると考えられる。筆者らが行なった実験では、全塩分量、分極抵抗および腐食面積率の3者の間には相関関係があ

るとの報告^{6)、7)}としているが、これら3者のばらつきについても相関関係があると推測される。今後は、さらに腐食が進行した段階における検討およびより多くのデータの収集が必要であると考えられる。

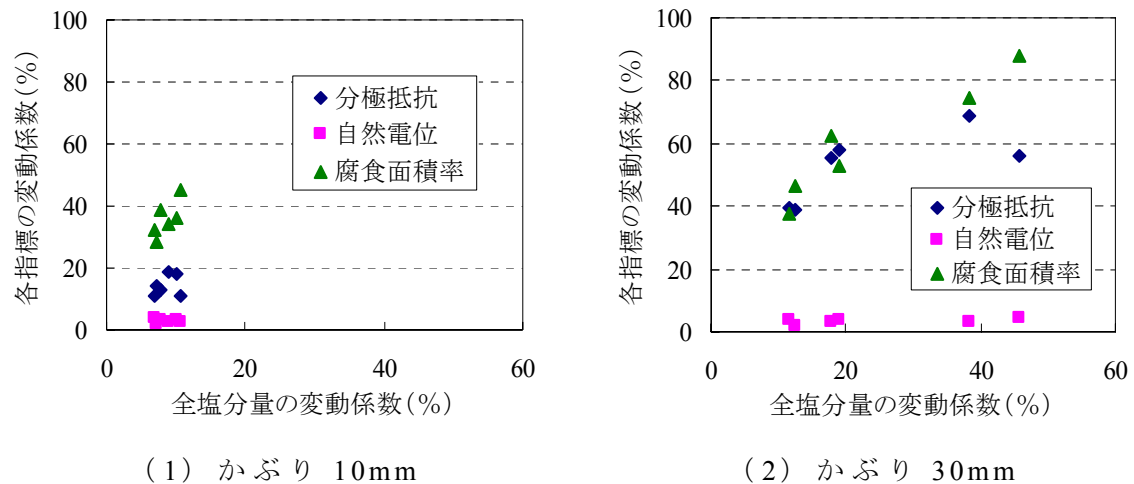


図 5.15 全塩分量の変動係数と各腐食指標の相関関係

5.5.2 腐食面積率の変動係数が与える影響

暴露開始後2年におけるかぶり10mmおよび30mmについて、腐食面積率の変動係数と鉄筋腐食モニタリング指標の変動係数との関係を図5.16に示す。

かぶり10mmでは、自然電位および分極抵抗ともに腐食面積率の変動係数によらずほぼ一定となっている。塩分が十分に供給され鉄筋全長に対して腐食が生じると、自然電位、分極抵抗および腐食面積率のばらつきは小さくなり平均化されるためと考えられる。これに対し、かぶり30mmでは自然電位は一定であるが、分極抵抗では腐食面積率の変動係数が大きくなるほど分極抵抗の変動係数も大きくなっている。自然電位は腐食・非腐食部の判断がばらつきの検討からも困難であると考えられるが、分極抵抗と腐食面積率の変動係数の間には相関関係が認められることから、分極抵抗を測定し、そのばらつきを検討することによって、内部の鉄筋の腐食状態に関してもどの程度ばらついているかを推定することが可能となると考えられる。このことから、点検箇所数の決定をする際の参考になる可能性もあると考えられる。

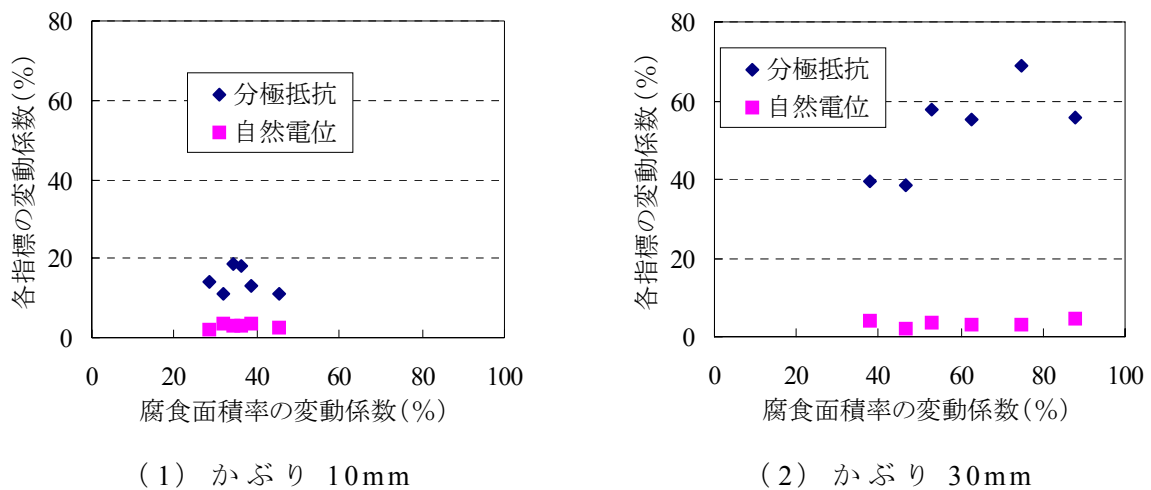


図 5.16 腐食面積率と分極抵抗および
自然電位の相関関係

5.5.3 分布を考慮に入れた維持管理対策

5.4.1および5.4.2で述べた鉄筋腐食に関する各指標の変動係数の関係から、塩分浸透量の分布によって腐食速度（分極抵抗）、腐食面積率、および腐食発生確率を推定することが可能であり、塩分浸透量のばらつきを低減すると、鉄筋の腐食性状のばらつきも低減できる。したがって、塩分浸透性に関してばらつきの大きなコンクリート中の鉄筋腐食性状を把握する場合、孔食に代表されるような腐食の進行度合いの差が大きくなり、詳細な点検作業が必要となる。ところが、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和する、あるいは高流動コンクリートを用いることによって、より一様なコンクリートが形成され、少ない点検箇所でも構造物全体の劣化状態を把握することが可能となる。その結果として維持管理に対して容易な構造物であると考えられる（図5.17参照）。

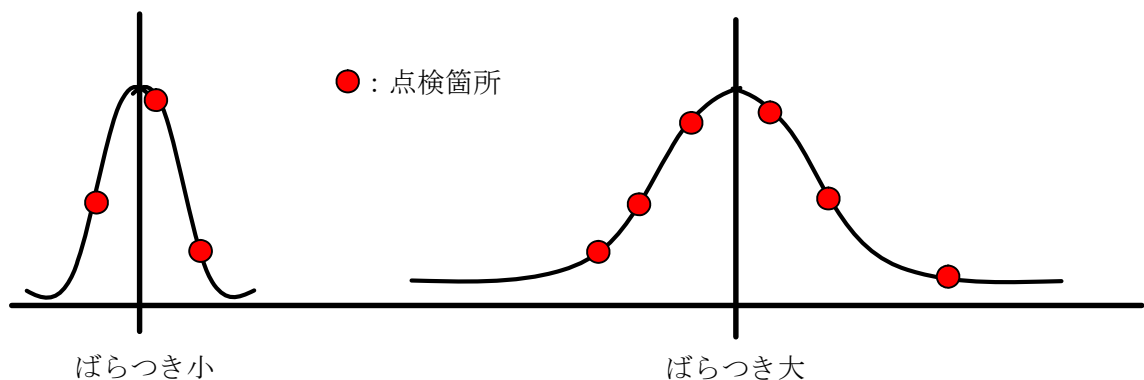


図 5.17 ばらつきと点検箇所の関係

また、既存構造物に対しては、非破壊検査である自然電位および分極抵抗を併用して用いることにより、腐食箇所の特定およびその分布性状が把握でき、その結果に基づいて鉄筋のはつりだしなどの検査を行うことが可能であると考えられる。さらに、塩分浸透量および腐食量の分布を定量化することによって、腐食確率で示されるような分布を考慮に入れた鉄筋の腐食について予測を行うことが可能となり、より統計的な観点に基づいた維持管理手法の提案を行うことができると考えられる。

5.6 本章のまとめ

本章の範囲内で得られた結果を以下に示す。

(1)シリカフュームおよび高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートは普通コンクリートと比べて塩分浸透量のばらつきを低減する効果があり、より一様なコンクリートが形成されていることが認められた。

(2)シリカフュームおよび高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートは塩分浸透のばらつきを抑制されていることを原因としてマクロセル的な腐食電池の生成を抑制する効果があり、普通コンクリートに比べて腐食面積率は小さな値を示していた。また、高炉スラグ微粉末はシリカフュームと比べても腐食抑制効果が大きいとの結果が得られた。

(3)腐食面積率および腐食箇所の割合で示した腐食発生確率と全塩分量の関係により、腐食発生限界量は $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあると考えられ、既往の研究結果と同様の結果が得られた。

(4)塩分浸透量、分極抵抗、および腐食面積率の3者の変動係数には相関関係が認められ、腐食があまり進行してない状態においては、塩分浸透量および分極抵抗の変動係数が大きいほど鉄筋の腐食面積率の変動係数が大きくなることが認められた。

(5)全塩分量と腐食面積率および腐食面積率とひび割れ発生確率の関係から、全塩分量の分布からかぶりコンクリート部のひび割れ発生確率を推定することが認められた。

(6)高流動コンクリートを用いることで、コンクリートの緻密性および均一性を向上させ、鉄筋腐食のばらつきを低減させる効果が認められたことから、塩害に対

する維持管理が容易となり、耐久性の向上につながると考えられる。

(7)既存の構造物に対しては、非破壊検査である自然電位および分極抵抗を用いることにより、腐食箇所の特定およびその分布性状が把握でき、その結果に基づいて鉄筋のはつりだしなどの検査を行うことが可能であると考えられる。さらに、塩分浸透量および腐食量の分布を定量化することによって、分布を考慮に入れた鉄筋の腐食について予測を行うことが可能となり、より統計的な観点に基づいた維持管理手法の提案を行うことができると考えられる。

参考文献

- 1) 中村裕ほか：海洋環境下におけるシリカフェームコンクリートの力学的特性、塩分浸透および鉄筋腐食に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.2、pp.529-534、2001
- 2) 依田彰彦ほか：20年間海水の作用を受けた高炉セメントコンクリートの耐久性に関する研究、セメントコンクリート論文集、No.45、1991
- 3) 小林孝一：混和材を用いた高流動コンクリートの細孔構造と鉄筋腐食に関する研究、京都大学博士論文、1999
- 4) 依田彰彦：高炉スラグを用いたコンクリート、コンクリート工学、Vol.34、No.4、pp.72-82、1996
- 5) コンクリート標準示方書[施工編]、土木学会、2002
- 6) 玉井譲ほか：コンクリートの種類が塩分量分布および鉄筋腐食に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.671-676、2003
- 7) 玉井譲ほか：種々のコンクリートにおける塩分量分布と鉄筋腐食の関係、補修・補強・アップグレードシンポジウム、No.3、2003

第6章 鉄筋の劣化予測に関する提案

6.1 はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化予測に関しては、現在用いられている一意的な安全係数ではなく、それぞれの変数を確率として扱うことが望ましい。確率論的に扱うためには、塩分量および鉄筋の腐食量の分布を把握することが不可欠である。しかし、維持管理にあたっては、その分布の平均値および標準偏差を構造物から多数のコアを採取することにより求めるのは現実的には無理がある。したがって、コンクリートの種類および混和材の種類を用いて間接的に推定可能なものでなければならない。コンクリート内部を均一な材料であるとせず、ばらつきを本来もっているものとして扱い、確率論的な手法および手順を構築することが重要である。

6.2 従来の劣化予測手法

6.2.1 耐久性照査と設計

コンクリート構造物における耐久性設計について、2002年制定コンクリート標準示方書[施工編]¹⁾では、コンクリート表面からの深さ方向の浸透量についてのみ照査を行うこととしている。また、塩分の浸透はかぶりコンクリートの深さ方向に対して均一な現象とみなされている。すなわち、コンクリート中への塩分侵入およびそれに伴う鋼材腐食の予測に関して1次元のフィックの拡散方程式に基づいて設計を行うこととしている。塩分浸透に対する設計拡散係数 D_d については、式(6.1)により算出する。次に、その設計拡散係数 D_d を用いて式(6.2)より、鋼材位置における塩分量の設計値 C_d を算出する。

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \left(\frac{w}{l} \right) \cdot \left(\frac{w}{w_a} \right) \cdot D_0 \quad (6.1)$$

ここに、 γ_c ：コンクリートの材料係数

D_k ：コンクリートの塩分に対する拡散係数の特性値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

D_0 ：コンクリート中の塩分の移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

w ：ひび割れ幅 (mm)

w_a : 許容ひび割れ幅 (mm)

w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比

式 (6.1) において、 D_k はひび割れによる影響を除いたコンクリート中の塩分の浸透のみに関する拡散係数を示している。また、 D_0 はひび割れが塩分の浸透に与える影響を表す割増し分に関する定数である。

$$C_d = \gamma_{ct} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1c}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right\} \quad (6.2)$$

ここに、 C_0 : コンクリート表面における想定塩分濃度 (kg/m^3)

c : かぶりの期待値 (cm)

t : 塩分の侵入に対する耐用年数 (年)

γ_{ct} : 鋼材位置における塩分濃度の設計値 C_d のばらつきを考慮した安全係数

最後に鋼材位置における塩分量の設計値 C_d の腐食発生限界量 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が 1 以下であることを確認する (式 (6.3) 参照)。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (6.3)$$

ここに、 C_{lim} : 腐食発生限界量

コンクリート標準示方書 [施工編] における耐久性に関する照査では、式 (6.1) から (6.3) のようにそれぞれ係数が乗じられているが、その各係数の定義を表 6.1 に示す。

表 6.1 各係数の定義

係数	名称	定義
γ_c	コンクリートの材料係数	構造物中のコンクリートと標準養生供試体間の品質の差を考慮した係数
γ_{cl}	コンクリート中の塩分濃度のばらつきを考慮した安全係数	塩分の浸透におけるコンクリートの均一性を考慮した係数
γ_i	構造物係数	コンクリート中の鉄筋の腐食発生限界塩分量のばらつきを考慮した係数

従来の設計手法においても、表 6.1 のようにばらつきは考慮されているものの、その設定方法については各々の係数を乗じることによって安全上の余裕をみている。特に塩分の浸透量のばらつきに関する γ_{cl} は、普通コンクリートを用いる場合は一般には 1.3 と定められているが、材料分離に対する抵抗性が高く均一性の確保に対する信頼性が高いと考えられている高流動コンクリートを用いる場合には 1.1 としてよいことになっている。しかし、これらの安全係数を乗じることにより得られる特性値の妥当性についてはあまり検討されていないのが現状である。なお、ばらつきおよび予測値の精度がある程度明らかになっている場合には、確率論的な解析手法を用いることにより、劣化因子に関する閾値および超過確率である危険率を適切に設定し安全係数を定めてもよいとされている。

6.2.2 点検と維持管理

施工後における鉄筋コンクリート構造物に対しては、点検を実施することにより劣化状態を把握することができれば、将来への予測およびその修正が可能となる。2001 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]²⁾では、点検は初期点検、日常・定期点検および詳細点検に分類されている。初期点検は構造物の使用開始以前、または大規模補修後に行うものであり、初期欠陥・損傷の有無を把握すると同時に、当初の劣化予測を行うために実施するものである。初期点検時に実施する劣化予測については、初期点検時に得られたデータを元に算出された劣化パラメータを用いる。また、日常・定期点検に関しては、目視あるいは打音による検査が主である。しかし、潜伏期における鉄筋腐食においては、外観変状が生じる

以前の問題である。よって、潜伏期における鉄筋腐食を検討するためには、詳細点検による検討が不可欠である。

潜伏期における鉄筋腐食に対する具体的な詳細点検項目としては、(1)コアの採取による塩分量の深さ方向の分布および中性化深さ、(2)非破壊的な手法(例えば自然電位・分極抵抗の測定)、(3)鉄筋のはつり出しによる鉄筋腐食状況の観察(例えば腐食面積率および腐食減量の測定)、などがある。これらの測定値に基づいて、(1)からは塩分の拡散係数、表面塩分量を推定し、(2)からは鉄筋の腐食減量を推定する。しかし、コンクリート中におけるこれらの劣化現象の推定に関しては、均一に進行していると仮定し、すべて確定論的に一定値として扱われることが多い。実際には、塩分による腐食に関しては、均一に鉄筋が腐食していることはまれであり、多くの場合局所的な腐食が生じていることが多く、(3)のような破壊検査によってはじめて明らかになることが多い。

6.3 確率に基づいた劣化予測手法

6.3.1 点検および劣化予測

ばらつきを考慮に入れた劣化予測を行うためには、劣化予測の精度を把握することが必要である。劣化予測の精度は予測手法の精度、点検結果の有無、その頻度および精度に依存する。したがって、劣化予測の安全余裕は、「予測手法の精度に関する安全係数」および「予測に用いるパラメータに関する安全係数」を適切に設定する必要がある。安全係数の値は点検結果の統計値に基づいて定めるか、あるいは既存の構造物により推定することが求められる。点検データにおいては、品質管理の程度や供試体と構造物との間の差異を考慮する必要がないため、一般に安全係数の低減が可能である。しかし、実際にはサンプル数に制限があること、あるいは劣化を生じた既設構造物の場合には材料特性のばらつきが大きくなっていることから、データの偏りが問題となり、この点においては逆に安全係数の増加を考慮しなければならない場合もある。

そこで土木学会では³⁾、劣化予測に用いるパラメータは、数多くの試料を構造物から採取して各パラメータのばらつきを統計的に評価し、所定の安全余裕を持って予測することが必要であるとしている。しかし、採取する試料の数が制限される場合においては、得られた点検結果から平均値を求め、「ばらつきを考慮する安全係数」および「試料数が制限されたことによる、点検結果と実際の構造物と

の誤差を考慮する安全係数」を用いてパラメータを設定し、予測結果に対する安全余裕を確保しなければならない。さらに、構造物の塩害劣化はどの部材でも同じ速度で進行することはない。したがって、劣化予測は劣化進行速度が類似した部材群ごとに行う必要がある。栈橋上部工に対して行われた点検結果に基づく劣化予測を行った研究⁴⁾では、拡散係数および表面塩分量はともに部位ごとの差が大きく、これらを用いて劣化予測を行った場合、塩分の浸透量に大きな差が認められるとの結果であった。

以上のようなばらつきを誘発する要因を考慮に入れて、点検結果を用いた塩分浸透の予測手法として式(6.4)が提案されている。

$$C(x,t) = \gamma_{cal} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_{cs} \left(C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + C_i \right) \quad (6.4)$$

ここに、 C_0 ：点検結果より求めた表面塩分濃度 (kg/m^3)

D ：点検結果より求めた塩分の見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

C_i ：初期含有塩分濃度 (kg/m^3)

γ_{cal} ：予測式の精度に関する安全係数

γ_p ：点検結果のばらつきを考慮する安全係数

γ_{cs} ：試料数が限定されたことによる点検結果値と、実際の構造物との誤差を考慮する安全係数

式(6.4)における各安全係数の設定において、 γ_p および γ_{cs} はコンクリート中における塩分浸透量のばらつき、および採取した試料数からそのばらつきをどの程度まで正確に推定できるかということについての係数である。また、 γ_{cal} は予測式と実際の現象との差についての余裕としての係数である。

しかし、安全係数を用いる手法では、劣化現象のばらつきをある程度定量的に把握することは可能であるが、鉄筋腐食の可能性を数値的に表現するのは困難であり、ライフサイクルコストの算出を正確かつ適切に行うことには無理がある。そのため、塩害による鉄筋腐食のばらつきに関しては定量的に腐食確率という概念を用いることによって、供用期間中の適切な維持管理対策の選定およびトータルコストの算定が可能になると考えられる。次節より、腐食確率の算定法および実際の鉄筋の腐食状況との関係について検討を行うこととする。

6.3.2 腐食面積率と腐食確率

コンクリート中を浸透する塩分の分布が鉄筋の腐食量に与える影響について、第5章で得られた全塩分量の分布に基づいた腐食確率の計算値と同じく第5章より得られた実際の各測定点の腐食面積率および腐食発生確率の関係について示す。

今回の実験の範囲における腐食確率の定義を中性化で行われている腐食確率の算出法⁵⁾に基づいて以下のように与える。まず、コンクリート中を浸透した塩分量の平均値を μ_{Cl} (kg/m³)、その変動係数を ν_{Cl} 、および鉄筋のかぶりの平均値を μ_{cover} (mm)、その標準偏差を σ_{cover} (mm) とおき、サンプル数が少ないこともありコンクリートごとに分布形状の差異はあるが、塩分量およびかぶりの分布は正規分布に従うと仮定する。塩分浸透量については供用期間とともに増加するので分布の指標として変動係数を用い、かぶりについては供用期間に関わらず一定であるので標準偏差を用いる。また、鉄筋の腐食の有無の境界については、腐食発生限界量 ($=Cl_{lim}$ (kg/m³)) を超えると腐食していると仮定する。これらの仮定に基づいた場合、供用期間 t 年における腐食確率 P_{corr} は以下のように示される。

供用期間 t 年、深さ x (mm) における塩分浸透量 $C(x,t)$ は、拡散係数 D (mm²/年)、表面塩分量 C_0 (kg/m³) を用いて式 (6.5) のように表される (図 6.1 参照)。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \quad (6.5)$$

次に、この $C(x,t)$ が深さ x における塩分浸透量の平均値 $\mu_{Cl,x}$ であるので、この点での浸透した塩分量が腐食発生限界量である Cl_{lim} (kg/m³) を超える確率 $P_{Cl,x}$ は式 (6.6) のようになる。

$$P_{Cl,x} = \int_{Cl_{lim}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\mu_{Cl,x} \cdot \nu_{Cl,x})^2}} \exp \left\{ -\frac{(s - \mu_{Cl,x})^2}{2(\mu_{Cl,x} \cdot \nu_{Cl,x})^2} \right\} ds \quad (6.6)$$

一方で、かぶりに関しても分布していることから、鉄筋表面の位置が図 6.1 における深さ $x = x - dx/2 \rightarrow x + dx/2$ の微小区間にある確率 $P_{cover,x}$ は式 (6.7) のように表される。

$$P_{cover,x} = \int_{x-dx/2}^{x+dx/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{cover}} \exp \left\{ -\frac{u - \mu_{cover}}{\sigma_{cover}} \right\} du \quad (6.7)$$

よって、深さ x の点において塩分浸透量が腐食発生限界量 Cl_{lim} を超え、かつその位置に鉄筋が存在している確率が、 x における腐食確率 $P_{corr,x}$ であり、かぶりと塩分浸透量の分布は互いに独立なことから両者の積で式 (6.8) のように表すことができる。

$$P_{corr,x} = P_{Cl,x} \cdot P_{cover,x} \quad (6.8)$$

したがって、供用期間 t 年後における腐食確率 P_{corr} は、コンクリート表面から微小区間 dx 毎に足しあわせたもの、つまり深さ x について 0 から ∞ まで積分した値となり、式 (6.9) のように表される。

$$P_{corr} = \int_0^{\infty} P_{Cl,x} \cdot P_{cover,x} dx \quad (6.9)$$

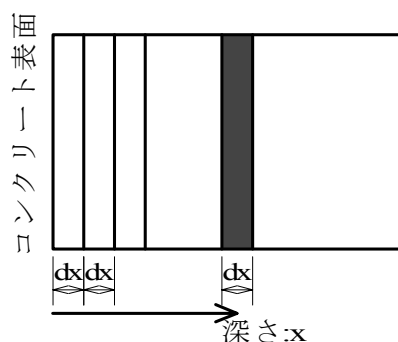


図 6.1 深さ方向の分割図

得られた腐食確率 P_{corr} は、鉄筋全長の中で腐食発生限界量を超え腐食が開始していると考えられる部分の割合のことである (図 6.2 参照)。

そこで、第 5 章と同様に、各測定点における腐食面積率が 1% を腐食・非腐食の境界と仮定して実験的に得られた腐食発生確率と腐食確率の関係を図 6.3 に示す。また、式 (6.9) より得られた腐食確率と各測定点における腐食面積率との関係についての計算結果を図 6.4 に示す。各コンクリートの鉄筋表面における塩分浸透量の平均値および変動係数については第 5 章より得られた結果を用い、かぶりについては供試体打設時にかぶりの確保を行っているので、ばらつきは少ないと仮定し、標準偏差を 0.5 と設定した。コンクリート標準示方書 [維持管理編] ²⁾

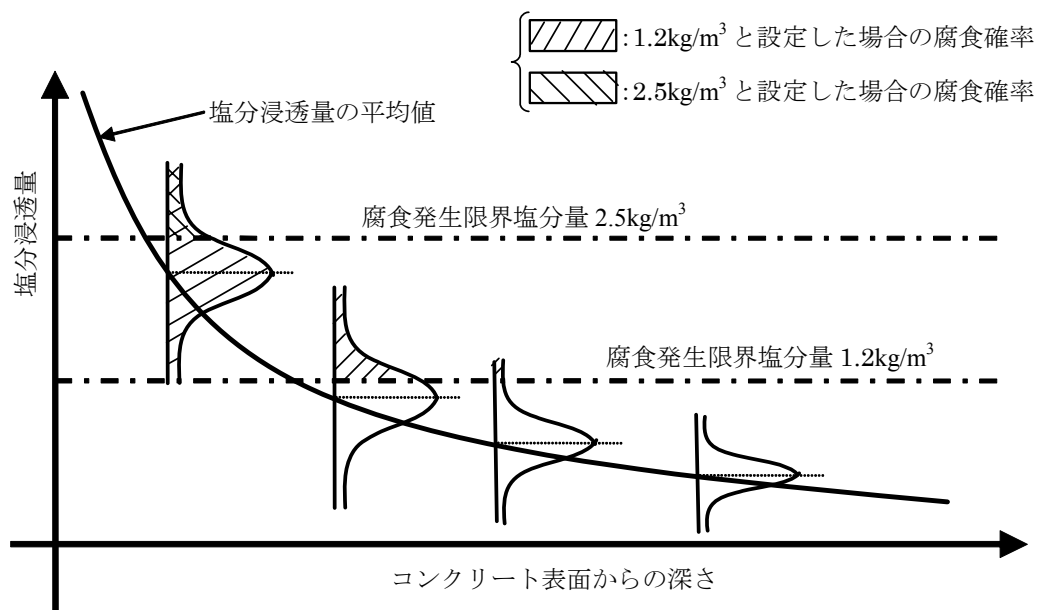


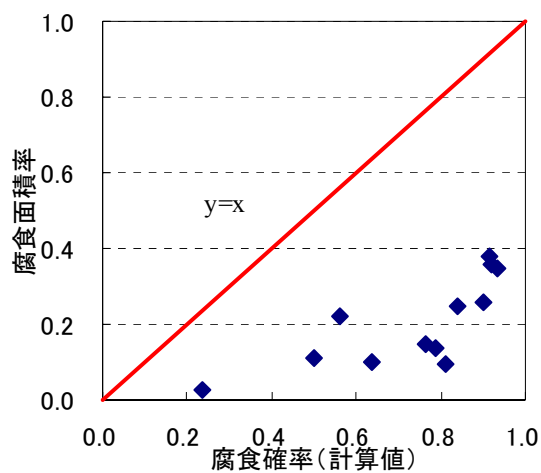
図 6.2 腐食確率の概念図

では、初期塩分がない場合の腐食発生限界量は 1.2～2.5 とされていることから、 Cl_{lim} に関しては最小値である 1.2kg/m^3 および最大値である 2.5kg/m^3 ⁶⁾ を設定した。

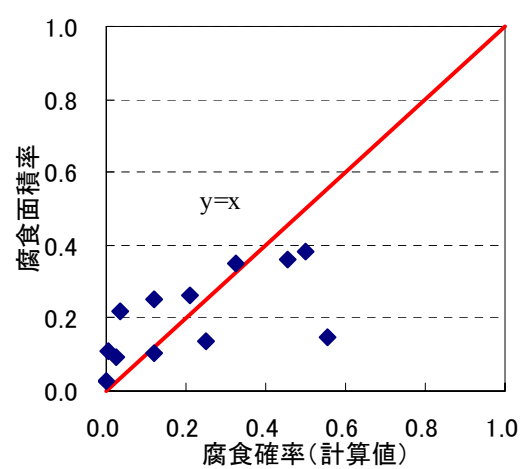
実験により得られた腐食発生確率と腐食確率との間には、腐食発生限界量を 1.2kg/m^3 と設定した方が 2.5kg/m^3 のときよりもよい相関が得られた。腐食発生限界量を 1.2kg/m^3 と設定した方が供試体内における測定点ごとの鉄筋の腐食のばらつきはよく表現していると考えられる。したがって、腐食発生そのものについては、 1.2kg/m^3 と想定した方がよいと考えられる。これに対し、腐食確率と腐食面積率との間には、腐食発生限界量が 1.2kg/m^3 の場合、計算による腐食確率よりも腐食面積率の方が小さくなった。また、 2.5kg/m^3 と設定した場合は、腐食面積率と腐食確率は大きく異なる点もあるもののほぼ同様の値を示すという結果が得られた。

腐食面積率が腐食確率よりも小さくなったのは、マクロセル腐食においては、アノード部とカソード部が形成されるため、アノード部が電気防食における犠牲陽極として挙動し、塩分量が多くなり腐食が進行した段階においても鉄筋全面にわたって腐食が発生することが少なくなるために、腐食確率よりも腐食面積率の方が小さくなったと考えられる。しかし、供用期間が長期となった場合には、犠牲陽極作用も錆層による影響などのために小さくなり、実腐食域は拡大し腐食確率に近くなるものと考えられる。

したがって、腐食確率を以上のように定義し、腐食発生限界量を適切に設定することにより、塩分浸透量の分布から腐食・非腐食の割合である腐食発生確率を表現することは可能であると考えられる。さらに、塩分浸透量の分布から腐食確率が算定されれば、1 より小さな係数を乗じることにより非破壊的にコンクリート中の鉄筋の腐食面積率を推定することができ、電気化学的な腐食モニタリングとともに、鉄筋の腐食状況を表す指標となる。しかし、既に述べたように長期における腐食確率と腐食面積率との関係については、鉄筋腐食の進行に伴い腐食面積率も大きくなるために係数は次第に大きくなっていくと考えられる。

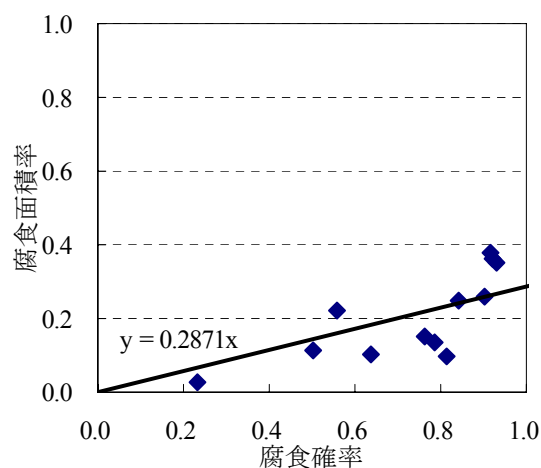


(1) 腐食発生限界量 1.2kg/m^3

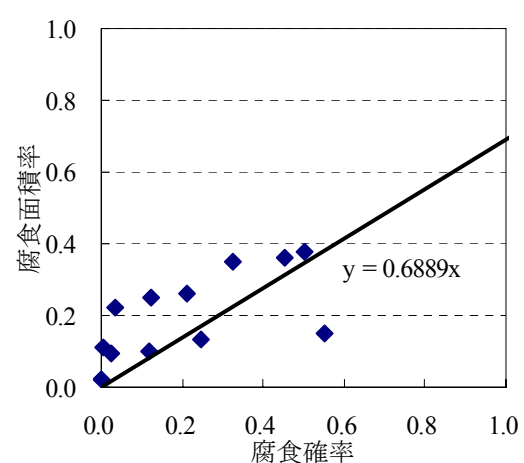


(2) 腐食発生限界量 2.5kg/m^3

図 6.3 腐食確率と腐食発生確率の関係



(1) 腐食発生限界量 1.2kg/m^3



(2) 腐食発生限界量 2.5kg/m^3

図 6.4 腐食確率と腐食面積率の関係

6.3.3 腐食確率および腐食面積率とひび割れ発生確率

式(6.9)より得られた腐食確率と各測定点におけるひび割れ発生確率との関係を図6.5に、腐食面積率とひび割れ発生確率の関係を図6.6に示す。腐食確率との関係では、腐食発生限界量が 1.2kg/m^3 および 2.5kg/m^3 の両者とも、ばらつきは大きい。腐食確率の大きいほどひび割れ発生確率も大きくなる傾向にある。長期の暴露における関係および鉄筋のかぶりによる検討をさらに行うことにより、計算により得られた腐食確率に基づくひび割れ発生確率の推定は可能であり、塩害に起因するひび割れ発生の予測も可能であると考えられる。一方、腐食面積率との関係では、ばらつきは大きいものの腐食面積率の大きいほど、ひび割れ発生確率も

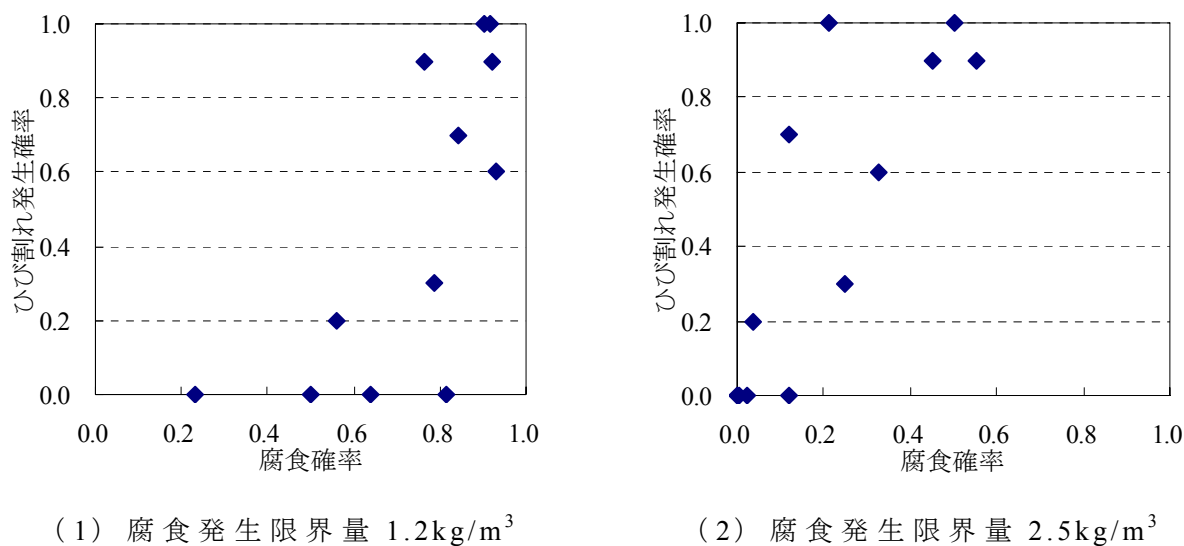


図 6.5 腐食確率とひび割れ発生確率の関係

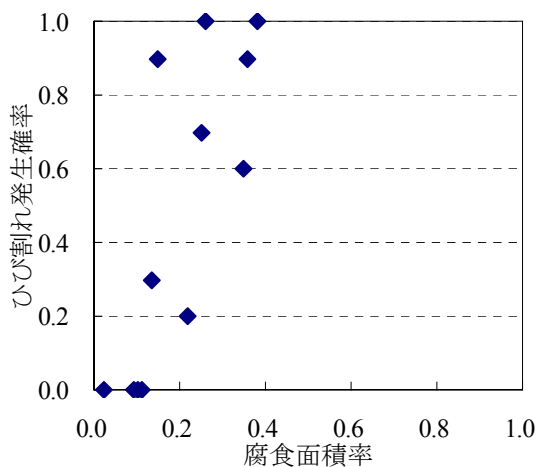


図 6.6 腐食面積率とひび割れ発生確率
(暴露 6 ヶ月および 1 年、かぶり 10mm)

大きくなる傾向が認められた。腐食面積率が0.3より大きくなるとひび割れ発生確率が大きくなっており、0.15～0.3を境界としてひび割れ発生の傾向が異なっていると考えられる。このように、塩分浸透量から算出された腐食確率および実際の腐食状況を示している腐食面積率からひび割れ発生確率が推定できるものと考えられる。

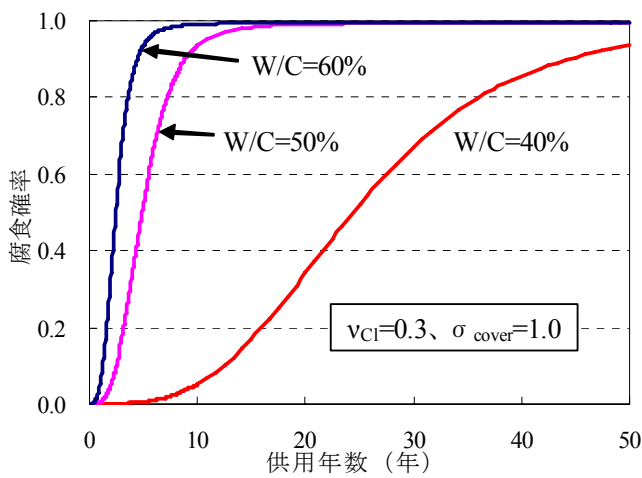
6.3.4 ばらつきを考慮した場合の劣化曲線

コンクリート中を浸透する全塩分量をばらつきを有するものとして扱う場合、鉄筋位置での塩分浸透量は一樣ではなくなり、腐食発生限界量を超える部分と超えていない部分が生じることになり、腐食発生についても差が生ずることになる。また、鉄筋のかぶりに関しても一樣ではないと考える必要がある。このように塩分浸透量およびかぶりがばらつく場合における腐食確率の経年変化について式(6.9)に基づいて計算を行った。表面塩分量については、2002年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕²⁾における飛沫帯を想定して 13kg/m^3 を用いた。用いたパラメータを表6.2に示す。水セメント比については、40、50および60%とした。拡散係数は第2章の式(2.7)を用いた。塩分浸透量の変動係数については、第5章の実験結果より得られた、無混和の普通コンクリート($v=0.6$)およびシリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリート($v=0.3$)に加えて、ばらつきがない場合($v=0$)および普通コンクリートよりもばらつきが大きい場合($v=1.0$)を設定した。かぶりの変動係数については、 $\sigma_{\text{cover}}=0、1.0、2.0、3.0(\text{cm})$ の4段階に設定した。また、6.3.2および6.3.3の結果より全塩分量、腐食状況(腐食面積率、腐食発生確率)、ひび割れ発生確率には相関関係があることから、ひび割れの発生を塩分浸透量から間接的に表現することが可能である。したがって、腐食発生限界量については、 1.2kg/m^3 および 2.5kg/m^3 の2種類を設定し、この値を超えると腐食すると仮定して計算を行った。

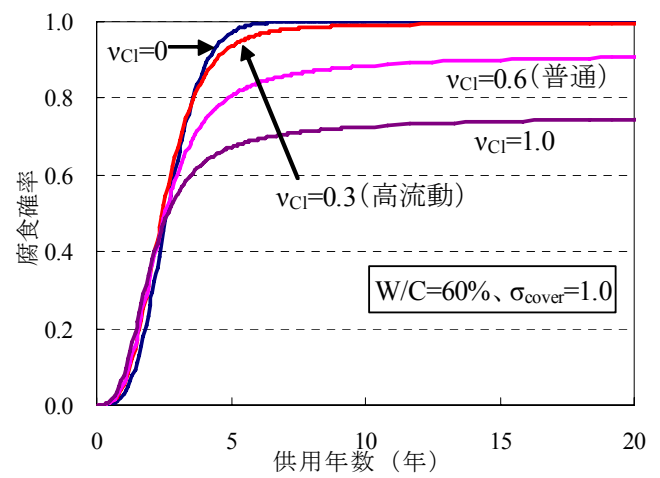
表6.2のパラメータを(6.9)にそれぞれ代入することによって腐食確率を算出した。腐食発生限界量を 1.2kg/m^3 と設定した場合の計算結果を図6.7に、腐食発生限界量を 2.5kg/m^3 と設定した場合の計算結果を図6.8にそれぞれ示す。

表6.2 各パラメータ

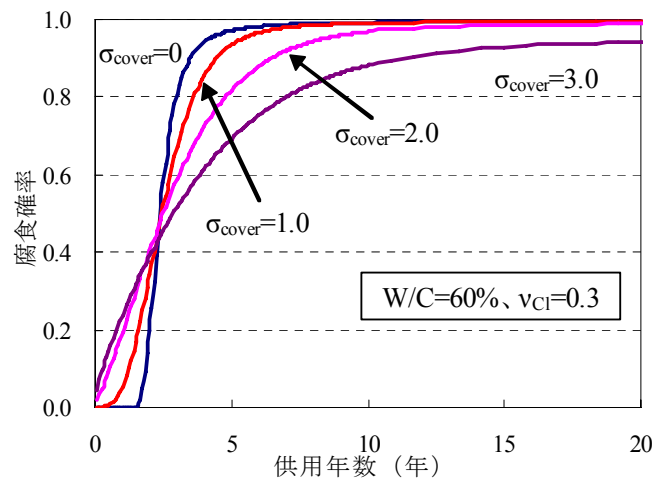
水セメント比 W/C(%)	60	50	40
拡散係数 $D(\text{cm}^2/\text{sec})$	6.34×10^{-8}	3.17×10^{-8}	6.34×10^{-8}
表面塩分量 $C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$	13		
塩分量の変動係数	0、0.3(高流動)、0.6(普通)、1.0		
腐食発生限界量(kg/m^3)	1.2、2.5		
かぶり	平均値(cm)	5.0	
	標準偏差(cm)	0、1.0、2.0、3.0	



(1) 水セメント比の影響



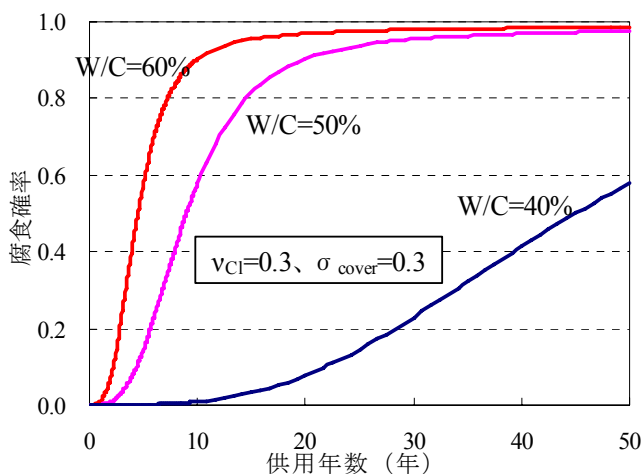
(2) 塩分浸透量のばらつきの影響



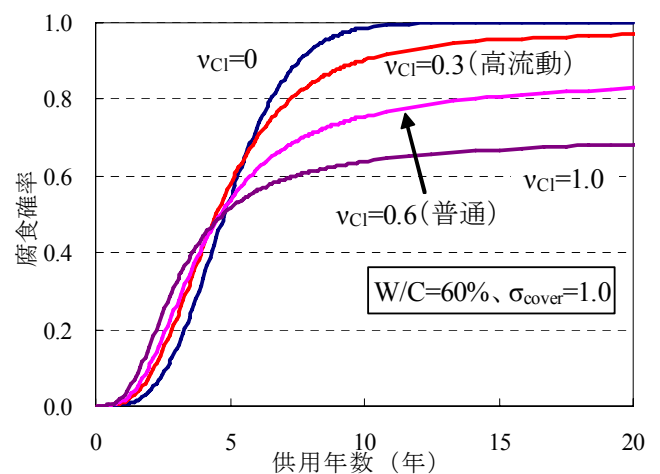
(3) かぶりのばらつきの影響

図 6.7 腐食確率の経年変化 (腐食発生限界量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$)

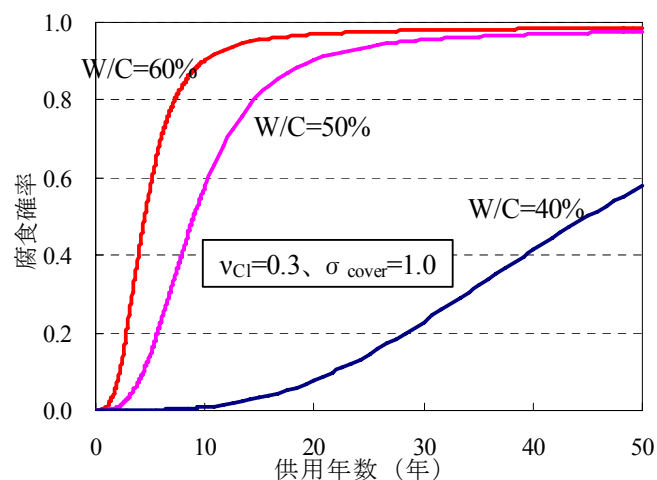
腐食発生限界量の設定値によらず、水セメント比の影響については、鉄筋腐食の開始時期は、水セメント比が小さい方が腐食の開始時期も遅く、腐食確率の増加割合も小さくなっている。水セメント比が小さい、すなわち拡散係数が小さいほど腐食確率の計算結果から鉄筋の腐食抑制効果が大きいと考えられる。特に水セメント比が40%においては、その影響が顕著であった。次に、塩分浸透量の変動係数の影響に関しては、変動係数が大きいほど、腐食が開始するまでの期間は若干短くなっている。ばらつきが大きいと局所的に浸透量が大きい点が生じるために、拡散係数が同一でも腐食開始が予測よりも早期に起こる可能性がある。また、腐食開始後は変動係数によらず腐食確率の増加割合はほぼ一定である。しかし、変動係数が大きいほど、早期に腐食確率の増加割合は小さくなり、より腐食



(1) 水セメント比の影響



(2) 塩分浸透量のばらつきの影響



(3) かぶりのばらつきの影響

図 6.8 腐食確率の経年変化 (腐食発生限界量 2.5 kg/m^3)

確率が小さい値に漸近している。これは、変動係数が小さいと均一に浸透していくため腐食が発生した時点では鉄筋のほぼ全長にわたって腐食が生じているために、腐食確率は1.0まで増加し漸近したと考えられる。一方、変動係数が大きい場合、鉄筋全長にわたって限界量に達することではなく、局所的に浸透量が大きい点が生じやすい。そのため、限界塩分量に達している腐食部と達していない非腐食部が同一の鉄筋内で長期間にわたり形成され、マクロセル腐食が生じ、局所的な腐食を促進させる危険性がある。最後に、かぶりの標準偏差の影響に関しては、塩分浸透量と同様にかぶりの標準偏差が大きいほど腐食が開始するまでの期間は短くなっている。また、腐食開始後の増加割合については、標準偏差が小さいほどその傾きは大きくなっており、早期に腐食確率が1.0に達している。これは、かぶりの標準偏差が小さいほど鉄筋全長にわたって均一に腐食が開始するために傾きが大きくなったと考えられる。しかし、塩分浸透量の場合ほど、腐食確率が小さな点で漸近するような傾向は認められない。

以上のように、塩分浸透量およびかぶりのばらつきが腐食確率の経年変化に与える影響を検討すると、腐食の開始についてはかぶりのばらつきの影響が大きく、供用期間が10年から20年における長期での腐食確率に対しては、塩分浸透量のばらつきの影響が大きいと考えられる。さらに、腐食・非腐食部が形成されるという点については塩分浸透量およびかぶりの両者のばらつきが影響を与えているが、塩分浸透量の方がその影響が顕著であることから、コンクリート中の塩分浸透量を均一にすることは、局所的な腐食を低減することに対して重要な要素となっていると考えられる。

また、中性化を主因とする腐食確率においては、腐食確率が15%で補修が必要とされている⁷⁾。そこで、各ケースにおける腐食確率が15%に達する年数について、かぶりが5cmの場合を表6.3に、厳しい腐食性環境に用いられるかぶりが7cm⁸⁾の場合を表6.4に示す。変動係数については普通コンクリートが0.6、高流動コンクリートが0.3に対応している。腐食確率が15%に達する期間については、塩分量の変動係数およびかぶりの標準偏差が小さいほど腐食確率が15%に達する期間は大きくなっており、かぶりの標準偏差の方がその影響が大きい。腐食確率が15%と腐食の初期段階においては、施工時に所定のかぶりを確保しそのばらつきを抑制することが重要であると考えられる。塩害における腐食確率と補修時期の関係については、実際の鉄筋腐食の状況を検討した上で独自に設定する必要があると

考えられる。

表6.3 補修が必要となるまでの年数(かぶり5cmの場合)

		塩分量の変動係数					かぶりの標準偏差				
		0	0.15	0.3(普通)	0.6(高流動)	1	0	0.5	1	2	3
腐食発生 限界量	1.2(kg/m ³)	1.67	1.46	1.43	1.40	1.25	1.92	1.80	1.43	0.82	0.54
	2.5(kg/m ³)	3.00	2.58	2.55	2.33	1.98	3.25	3.08	2.55	1.44	0.96
		水セメント比(%)									
		40	50	60							
腐食発生 限界量	1.2(kg/m ³)	14.2	2.90	1.42							
	2.5(kg/m ³)	25.5	5.06	2.55							

表6.4 補修が必要となるまでの年数(かぶり7cmの場合)

		塩分量の変動係数					かぶりの標準偏差				
		0	0.15	0.3(普通)	0.6(高流動)	1	0	0.5	1	2	3
腐食発生 限界量	1.2(kg/m ³)	3.74	3.41	3.33	3.16	2.83	3.98	3.80	3.33	2.33	1.51
	2.5(kg/m ³)	6.83	6.08	5.77	5.16	4.25	6.67	6.48	5.77	4.12	2.76
		水セメント比(%)									
		40	50	60							
腐食発生 限界量	1.2(kg/m ³)	33.3	6.67	3.33							
	2.5(kg/m ³)	61.2	7.01	5.77							

6.3.5 分布を考慮に入れた安全係数の算定

6.3.4において、塩分浸透量およびかぶりのばらつきが鉄筋の腐食確率、すなわち鉄筋腐食の分布性状に影響を与えることが確認された。そこで、塩分浸透量およびかぶりの分布を考慮に入れた安全係数の算定を行うことがより最適な耐久性設計を行う上で重要である。塩分浸透量およびかぶりにおいて分布を考慮に入れた設計値の設定について図6.9に示す。設計値の設定方法については、各パラメータの代表値（平均値、中間値）に安全係数を乗じることによって、ばらつきに対する安全側の余裕をみている。コンクリート中の鉄筋腐食においては、塩分浸透量では設計上の最大値（ S_{\max} ）を、かぶりでは設計上の最小値（ R_{\min} ）をそれぞれ設定することによって鉄筋腐食に対する設計を行う必要がある。しかし、本来塩分浸透量およびかぶりはばらつきを有しているために、設計上の最大値を上回る、あるいは最小値を下回ることも起こりうるので、当然ではあるが絶対的な安全性は確保されない。塩分浸透量およびかぶりのそれぞれにおいて、超過確率 p および不足確率 q を設定することにより安全係数は定義される（式（6.10）、式（6.11）⁹⁾。

$$\alpha \cdot \mu_s = \Phi^{-1}(p, \mu_s, \sigma_s) \quad (6.10)$$

$$\frac{1}{\beta} \mu_R = \Phi^{-1}(1-q, \mu_R, \sigma_R) \quad (6.11)$$

ここに、 α ：塩分浸透量に関する安全係数

β ：かぶりに関する安全係数

μ_s 、 μ_R ：塩分浸透量およびかぶりの平均値

σ_s 、 σ_R ：塩分浸透量およびかぶりの標準偏差

なお、 $X = \Phi^{-1}(p, \mu, \sigma)$ は $p = \int_X^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dx$ の逆関数を示しており、

確率 p の値をとる X のことを指している。

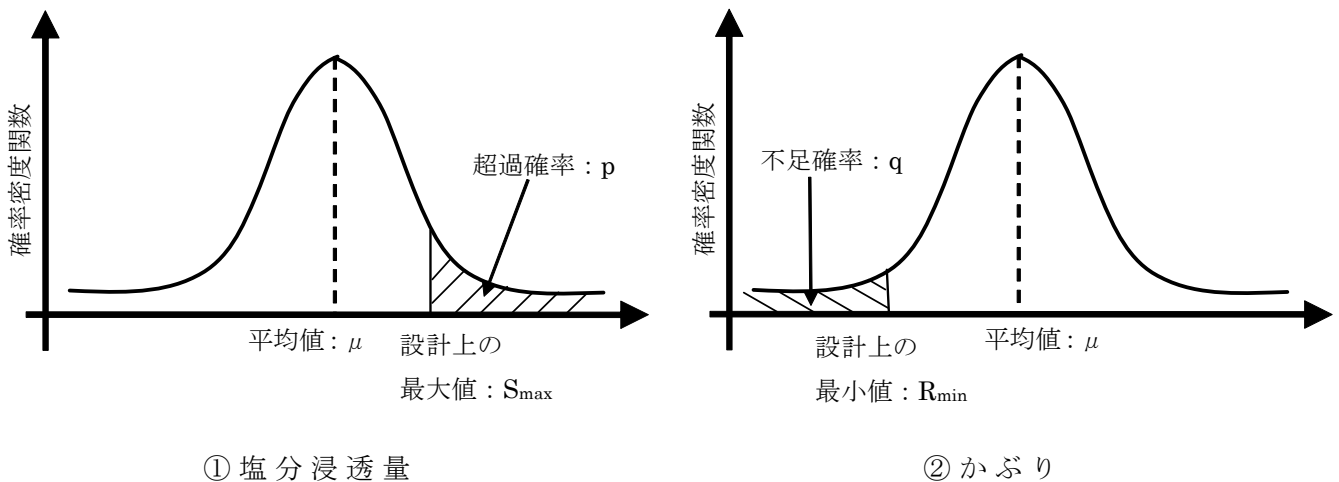


図 6.9 分布を考慮に入れた設計値の算定

実際に、式 (6.10) および (6.11) に基づいて、塩分浸透については超過確率と安全係数 α の関係を、かぶりについては不足確率と安全係数の関係を図 6.10 に示す。なお、腐食確率算出の場合と同様に、塩分浸透量については変動係数を一定とし、かぶりについては標準偏差を一定と仮定して計算を行った。塩分浸透量に関しては、変動係数が大きいほど安全係数は小さくなっている。また、変動係数が大きい場合は、超過確率が大きいほど安全係数は小さくなる傾向があるが、変動係数が小さい場合は、超過確率によらず安全係数はほぼ一定の値を示している。2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾ では、塩分浸透量の安全係

数を1.3（高流動コンクリートの場合は1.1）と規定されているが、通常程度のスランプを有したコンクリートでは、今回の実験においては変動係数が0.6程度であるために、安全係数が1.3では危険側の設計になる可能性があるものと考えられる。これに対し、高流動コンクリートでは、安全係数を1.1に設定しているのは妥当な値であると考えられる。また、普通コンクリート（ $v_{ci}=0.6$ ）の場合において、安全係数を示方書で用いられている1.3と設定した場合の超過確率は、式（6.10）により42%と計算され、この超過確率に基づいて、高流動コンクリート（ $v_{ci}=0.3$ ）の場合において安全係数の算出を行なうと1.04となる。変動係数が小さいと超過確率による安全係数の変化は小さくなるために、示方書で示されている1.1よりも若干小さな値となる。

かぶりに関しても、塩分浸透量とほぼ同様の傾向が得られているが、かぶりの標準偏差が大きい場合には、不足確率が安全係数に与える影響が他と比べて大きくなっている。塩分浸透量およびかぶりの安全係数の算定により、両者のばらつきを低減させた方が、安全係数を大きく低減でき、合理的な設計が可能となると考えられる。

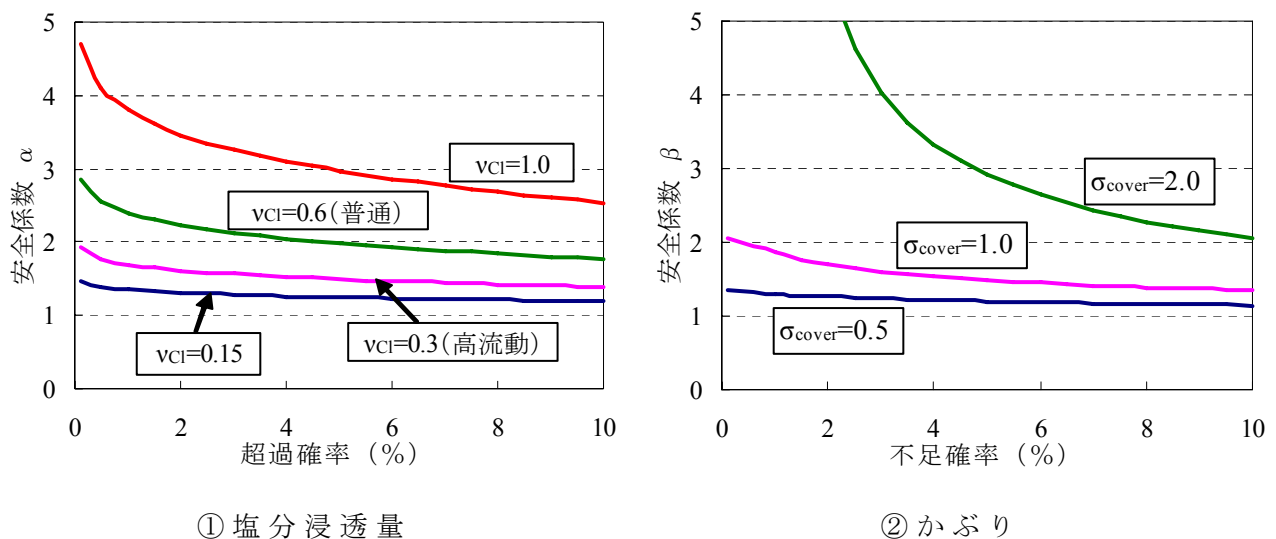


図 6.10 超過確率、不足確率と安全率の関係

6.4 劣化予測におけるライフサイクルコスト

6.4.1 確率論的手法に基づいたライフサイクルコストの算出

塩分の浸透に関するコンクリート構造物の補修および補強を含めたライフサイクルコストについて確率論的モデルに基づいて検討を行う¹⁰⁾。一例として、海

洋環境における橋脚の最適な補修および補強方法の選定手法について取り上げる。

補修および補強の選定に関する問題は統計学的解析に基づいて行われることが多く、この場合劣化指標についてのばらつきを考慮したうえでの最適な補修・補強方法を決定することとされる。最適法とは、最大に期待される有用性または最小の費用を導くものである。補修に対する費用のみを考えるならば、最適解は式（6.12）で表される。

$$\min C \quad (6.12)$$

$$s.t. P_f \leq P_f^{\max}$$

C : 補修にかかる費用

P_f^{\max} : 対象となる事象の最大値

（例えば、荷重が構造物の荷重限界値を上回るなど）

また、供用開始後 i 年後に補修を行う場合の費用は式（6.13）により決定される。

$$C = \sum_{i=T_d}^{T_L} P(i\text{年での補修}) C_i \quad (6.13)$$

T_d : 補修の決定がなされた時点、 T_L : 構造物の設計供用年数

C_i : 補修が i 年後に行われた場合の補修費用

構造物に対して補修が i 年後に行われる確率は P で、表面塩分量、拡散係数および鉄筋腐食量で表される変数となる。

また、補修後に必要となるコストについては、補修が供用開始後 i 年で行われることに関係するコスト C_i は式（6.14）で決定される。

$$C_i = \sum_{j=T_d}^{T_L} C_{i,j} \frac{1}{(1+r)^{j-T_d}} \quad (6.14)$$

$C_{i,j}$: 補修が供用期間 i 年後に行われた場合において、補修後 j 年にかかる費用

r : 社会的割引率

確率論的モデルの主な利点は、測定結果の変動（ばらつき）を考慮に入れられることである。また、トータルコストを最小化するためには、補修が必要となる

劣化レベルにまで達する確率およびその補修コストに加えて補修後に要するコストについても確率論的に検討することが重要である。

塩分量のばらつきの大小がコストに与える影響について表 6.5 に示す。ばらつきが大きいと腐食確率の収束値は小さくなり長期にわたり、腐食・非腐食部が存在するためにマクロセル腐食が促進され腐食量は大きくなる可能性がある。そのため点検時においては、点検箇所数が少ない場合ばらつきが大きいと腐食量が大きい場所を検知できていない可能性があり、劣化状況を過小評価する恐れがある。そのために点検箇所数を十分に確保する必要がある、さらに劣化程度が大きい箇所に対してはより大規模な補修・補強を行う必要が考えられるために維持管理のコストはばらつきが小さい場合に比べて大きくなるものと考えられる。

また、ばらつきが大きいと平均値としては性能を十分に満足しているが、要求性能を満足できない部分が早期に発生するものと考えられ、その性能を維持するための補修コストも大きくなる。これに対し、ばらつきが小さい場合には、平均値を用いて性能低下の代表値として検討することが可能となり、補修時期も遅らせることが可能となる。そのため必要な補修コストも小さくなる(図 6.11 参照)。

したがって、維持管理を行うにあたっては、点検コストを低減することもコストを削減する手法の一つであり、そのためには点検箇所数を可能な限り少数にすることが不可欠であると考えられる。

腐食確率に基づいた、劣化状況に応じた点検コスト、およびその結果に基づいた維持管理に関わるトータルコスト C_{maint} の算出法については、点検コスト C_{insp} に関しては塩分浸透量、およびかぶりのばらつきに、また補修・補強コスト C_{rs} に関しては腐食確率 P_{corr} により表現され、合わせて式 (6.15) のように表されると考えられる。

$$C_{\text{maint}} = C_{\text{insp}} + C_{\text{rs}} = f(\nu_{\text{Cl}}, \sigma_{\text{cover}}) + g(P_{\text{corr}}) \quad (6.15)$$

表 6.5 塩分浸透量のばらつきが点検およびコストに与える影響

塩分浸透量のばらつき	腐食確率の収束値	鉄筋腐食のばらつき	点検箇所数	点検のためのコスト	補修・補強のコスト
大	小	大	多数必要	大	大(孔食多)
小	大	小	少数でも可	小	小(孔食少)

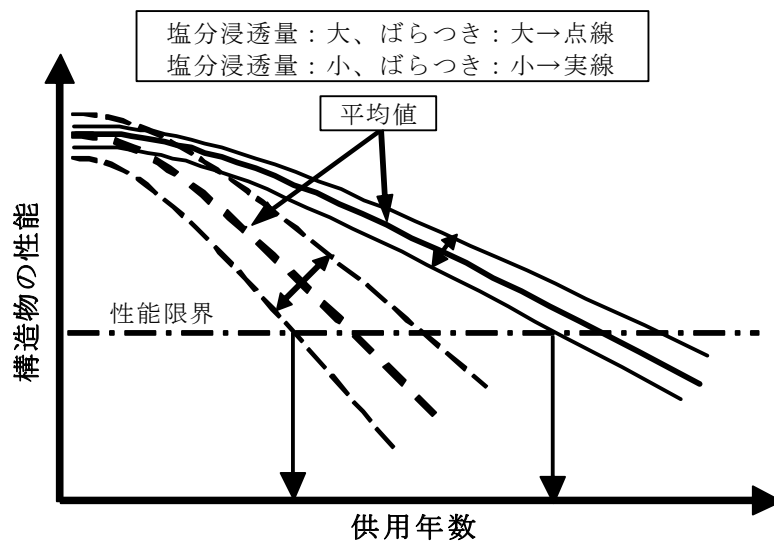


図 6.11 ばらつきが性能低下に与える影響

6.4.2 ライフサイクルコストの試算

ライフサイクルコストの算定におけるコンクリート構造物として、塩害環境に曝されている高架橋の鉄筋コンクリート桁を対象とした。鉄筋腐食の程度について把握するために、普通コンクリートおよび高流動コンクリートを用いた場合における、腐食確率の経年変化を図 6.12 に示す。補修時期に関しては、中性化による腐食において部分的にかぶりの剥落が生じるとされている⁷⁾ 腐食確率 0.6 に達するまでの期間とし、普通コンクリートについては 5 年、高流動コンクリートについては 10 年ごとに補修を行なうとした。点検に要する費用については、普通コンクリートでは 20 (千円/ m^2)、高流動コンクリートについては 12 (千円/ m^2) で一定とした¹¹⁾。補修工法は断面修復工法とし、いずれのコンクリートを用いた場合においても 120 (千円/ m^2) とした¹¹⁾。初期コストについては、普通コンクリートの場合は 40 (千円/ m^2)、高流動コンクリートの場合は 80 (千円/ m^2) とした。また、社会的割引率に

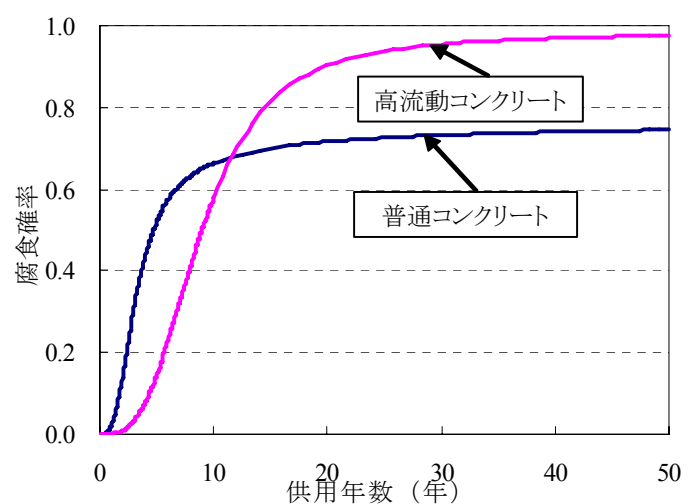


図 6.12 高流動コンクリートおよび普通コンクリートの腐食確率の経年変化

関しては、国土交通省が定めている 4%¹²⁾ およびそれより小さな場合として 1% に設定した。ライフサイクルコスト算出に用いた各パラメータを表 6.6 に示す。なお、今回のライフサイクルコストの算出においては、人件費などの材料費以外の諸費用および施工のばらつきについては考慮に入れていない。補修費用の算出方法については、図 6.13 に示すように、各期間において補修が必要・不必要となる確率を腐食確率により表す場合（ケースⅠ）と、図 6.14 に示すように各期間において補修が必要となる面積の割合を腐食確率により表す場合（ケースⅡ）の 2 種類のケースに分けて検討を行った。なお、両ケースにおいて、未補修の部分は劣化は進行し、補修を行なった部分は健全な状態に戻ると仮定している。

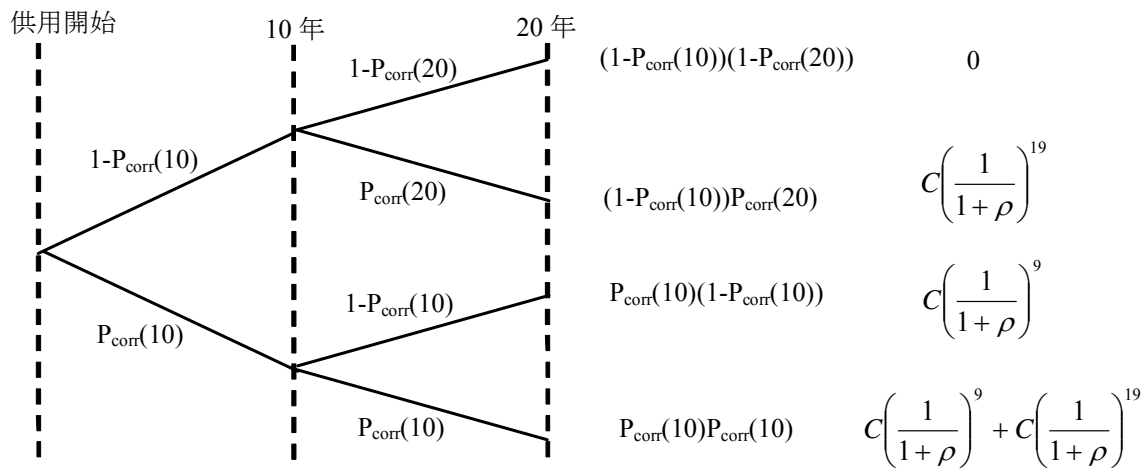


図 6.13 補修箇所割合による補修費用の算出モデル

（例 高流動コンクリート 供用年数 20 年の場合）

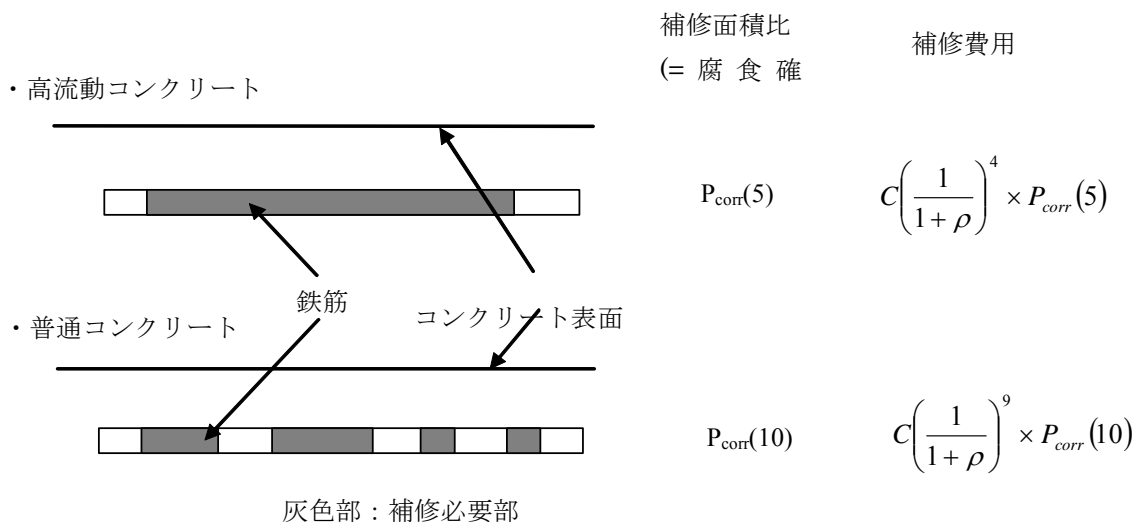


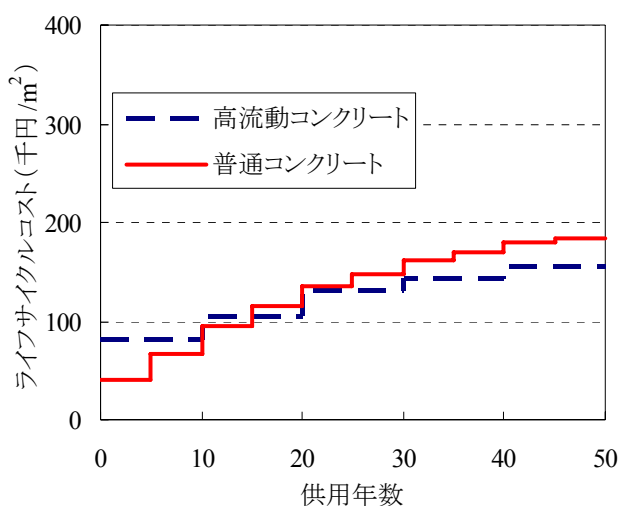
図 6.14 面積比による補修費用の算出モデル

表6.6 ライフサイクルコストに関する各パラメータ

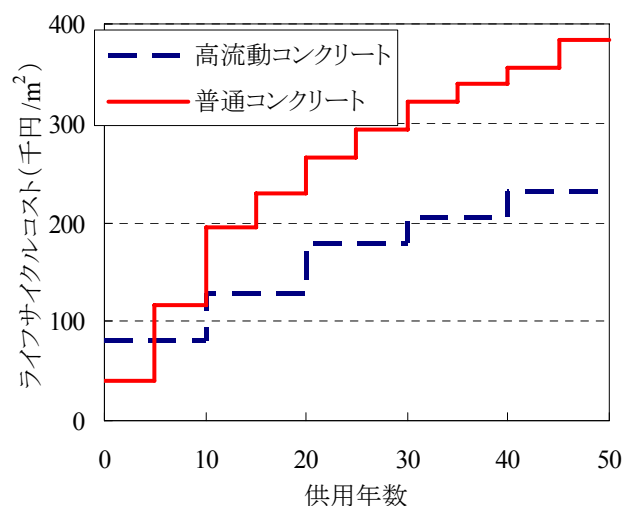
	高流動コンクリート	普通コンクリート
建設費用(千円/m ²)	80	40
点検費用	20	12
補修費用(千円/m ²)	120	
補修間隔(年)	10	5
補修する面積比	1.0(ケースⅠ)	
	1.0(ケースⅡ)	0.6(ケースⅡ)
社会的割引率	0.04、0.01	

① ケースⅠ

腐食確率と補修費用の積により算出したライフサイクルコストの経年変化を図 6.15 に示す。社会的割引率を 4%と設定した場合においては、供用年数が 15 年以下では、普通コンクリートよりも高流動コンクリートを用いた方が初期コストが小さいためにライフサイクルコストは小さく経済的である。しかし、供用年数が 15 年以上では、高流動コンクリートの方がライフサイクルコストは小さくなり、供用年数が長くなるほどその差は大きくなっている。供用年数を 50 年と設定すると、高流動コンクリートを用いて建設した方が、ケースⅠにおいては算出したライフサイクルコストで約 2 割の削減が可能であるという結果が得られた。これに対して、社会的割引率を 1%と設定した場合においては、補修費用が大きく見積もられているために供用年数 5 年で普通コンクリートの方がライフサイクル



(1) 社会的割引率 4%



(2) 社会的割引率 1%

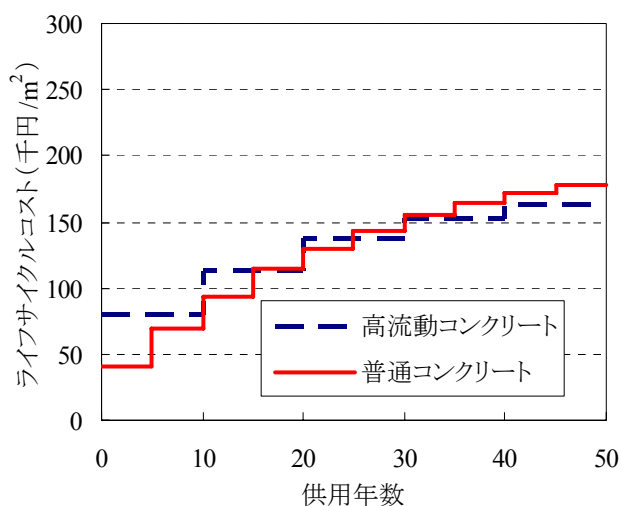
図 6.15 ライフサイクルコストの経年変化 (ケースⅠ)

コストは大きくなり、供用年数を 50 年とするとライフサイクルコストで約 4 割の削減が可能であるとの結果が得られた。

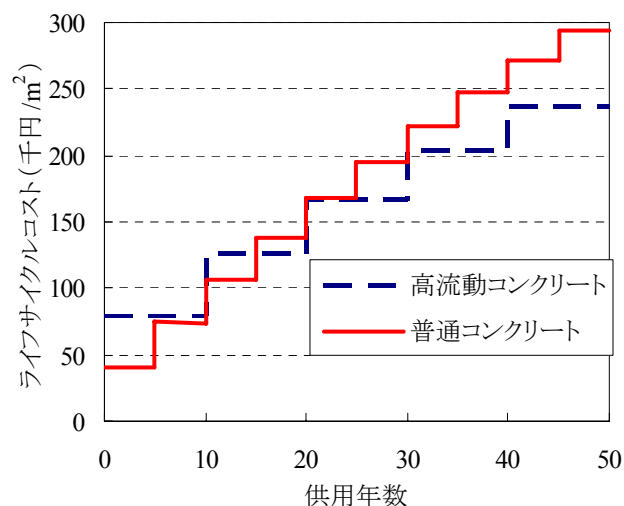
① ケース II

腐食確率による補修面積比によって算出されたライフサイクルコストの経年変化を図 6.16 に示す。社会的割引率が 4% の場合においては、供用年数 25 年程度で普通コンクリートの方がライフサイクルコストが大きくなるが、供用年数を 50 年としても、高流動コンクリートの方が若干小さくなるもののケース I ほどのライフサイクルコストに大きな差は認められない結果となった。このことは、社会的割引率を 1% と設定した場合においても同様であった。これは、面積比として考えた場合、普通コンクリートの方が高流動コンクリートに比べて補修面積比が小さいために、補修間隔が小さくことと相殺されて、有意な差が認められなかったと考えられる。

ライフサイクルコストの算出にあたっては、その算出方法の違いにより差がみられるため、算出する構造物の特徴に合わせた適用性を検討する必要があると考えられる。



(1) 社会的割引率 4%



(2) 社会的割引率 1%

図 6.16 ライフサイクルコストの経年変化 (ケース II)

6.5 本章のまとめ

本章の範囲内で得られた結果を以下に示す。

(1)塩分浸透量および鉄筋のかぶりが正規分布に従うと仮定した場合、両者の関係および腐食発生を統計的に算出を行った腐食確率と実際に腐食発生確率との間には、腐食発生限界量を 1.2kg/m^3 と設定した場合においてよい相関が見られた。腐食確率を用いて、腐食発生限界量を適切に設定することにより、塩分浸透量の分布から腐食の割合を表現することが可能であると考えられる。また、腐食確率に係数を乗じることにより鉄筋の腐食面積率の推定も可能であることが明らかとなった。

(2)分布を考慮に入れた塩分浸透による鉄筋の腐食確率に関する劣化曲線の算定を行った場合、ばらつきが大きなコンクリートの方が腐食開始時期が早期に表れ、また腐食部と非腐食部が長期間にわたり継続した。そのため、腐食部と非腐食部においてマクロセル腐食が生じ、孔食などの局所的な腐食が形成される危険性が考えられる。

(3)塩分浸透量およびコンクリートのかぶりの設計に関して、分布を考慮に入れた安全係数の算定を行うことにより、鉄筋コンクリート構造物の重要性および供用期間に応じて適切な安全率の設定を行うことが可能となり、より合理的な耐久性設計ができると考えられる。

(4)ばらつきの大きなコンクリートを用いると、鉄筋の腐食に関して局所的な劣化部が存在する可能性があるために、ばらつきが小さなコンクリートに比べてより多くの点検箇所数を確保する必要があるため、早期に補修を行う必要が生じる可能性が考えられる。

(5)高流動コンクリートを用いた場合、普通コンクリートに比べて建設コストは高くなるために供用期間が短い場合においては不経済となるが、供用期間が長い場合においては、補修間隔を小さくし、かつ点検コストを抑制することができるために維持管理コストを低くすることが可能となるという結果が得られた。高流動コンクリートを用いることによりライフサイクルコストを抑制することが可能である。しかし、算出の方法によって差がみられるために実構造物に対する適用性については検討の必要がある。

参考文献

- 1) 2002 年制定コンクリート標準示方書[施工編]、土木学会、2002
- 2) 2001 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]、土木学会、2001
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]に準拠した維持管理マニュアル（その 1）および関連資料、コンクリート技術シリーズ 57、2003.11
- 4) 守分敦郎、長瀧重義、大即信明、関博、福手勤：塩害を受けた栈橋に対する表面処理工法の設計法に関する検討、土木学会論文集、No.534/□-30、pp109-123、1996
- 5) 岸谷孝一、西澤紀昭編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ、中性化、技法堂出版、1997
- 6) High Performance Concrete and Reinforcing Steel With a 100-Year Service Life
- 7) 和泉意登志：構造物の耐久性設計手法例－鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法－、コンクリート工学、26、No.11、pp.38～42、1988.11
- 8) 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、土木学会、2002
- 9) 星谷勝：確率論的手法による構造解析、鹿島出版会、1974
- 10) S.Engelund et al: Evaluation of Repair and Maintenance Strategies for Concrete Coastal Bridges on a Probabilistic Basis, ACI Material Journal, pp160-166, 1999
- 11) 北後征雄：鉄筋コンクリート鉄道構造物の鉄筋腐食に関する実証的研究、京都大学学位論文、2000
- 12) 国土交通省：公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針、2004

第 7 章 結 論

本論文は、コンクリート構造物のシナリオを設定する上で重要となる維持管理の中で、鉄筋腐食の劣化予測に着目し、腐食の原因となる塩分の浸透に関して分布を考慮に入れた評価を行うことを目的とした。また、混和材を使用したコンクリートあるいは化学的侵食を受けるコンクリート中の腐食に対する非破壊的な検査手法である電気化学的モニタリングの適用性についての検討を行うことも目的とした。

以下に、各章により得られた結論を総括する。

3 章では、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート、さらにスランプ性状の異なるコンクリート中の塩分浸透性について電気泳動試験による促進試験を含めて検討を行った。また、シラン処理を行ったコンクリートの塩分浸透抑制効果に関して検討を行い、以下の結論を得た。

(1)乾湿繰返しによる暴露試験により、無混和の普通コンクリートに比べて、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは同一水結合材比においても十分な塩分浸透に対する抑制効果が認められた。また、普通コンクリートと高流動コンクリートのスランプの違いによる塩分浸透性については明確な傾向は認められなかった。

(2)シランにより表面処理を行ったコンクリートは、無処理と比べて大きな抑制効果が見られ、塩害防止対策として適用が可能であると考えられる。しかし、浸透深さが小さなシランについては、定期的な再処理が必要となると考えられる。

(3)表面塩分量および拡散係数の経時変化に関して暴露期間が 2 年であるが、表面塩分量は暴露期間とともに大きくなる傾向が見られ、無混和のコンクリートにおいてその傾向が顕著であった。シリカフュームを混和したコンクリートはほぼ一定となり、表面近傍における塩分の滞留は認められなかった。一方、拡散係数では暴露期間が短期間であることもあり明確な傾向は認められなかった。

(4)電気泳動試験および浸せき試験による各々の拡散係数の算出結果から、シリカフューム、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、無混和に比べて塩化物

イオンの固定化能力に優れているために、水密性の向上とともに塩分の浸透抑制に大きな影響をおよぼしていると考えられる。

(5)水結合材比が 17%の超高強度コンクリートの塩分浸透に対してきわめて大きな抑制効果を有しているものと考えられる。

4 章では、シリカフュームおよび高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート、あるいは化学的侵食を受けたコンクリート中の鉄筋腐食に対して通常用いられている電気化学的な非破壊検査手法（自然電位、分極抵抗）に与える影響について検討を行い、以下の結論を得た。

(1)自然電位による腐食の判断については、無混和のコンクリートに対しては ASTM 基準が適用できるという結果が得られたが、高炉スラグ微粉末に対しては、腐食していないにも関わらず自然電位が -300mV と卑な値を示すことから、ASTM 基準による腐食の判断は困難であると考えられる。

(2)分極抵抗逆数の積分値による腐食程度の把握については、無混和、シリカフューム、高炉スラグ微粉末混和のコンクリートによらず、同様の傾向を示しており、混和材の有無によらない腐食程度のある程度の把握が可能であると考えられる。

(3)硫酸侵食では、フェノールフタレイン法により得られる中性化深さよりも深部にまで硫酸イオンは浸透している。したがって、硫酸侵食を受ける場合の鉄筋腐食の発生・進展においては、pH の低下による影響のみでなく、硫酸イオンが与える影響も併せて検討する必要がある。

(4)硫酸侵食の場合では、中性化残りや硫酸イオン残りで腐食開始を判断することができる。一般的な方法であるフェノールフタレイン法による中性化残りで評価すると、本実験で用いたモルタルの場合では、 17mm 程度が腐食開始の限界値であった。

(5)硫酸侵食に対する鉄筋腐食モニタリングに関して、生じるカソード反応が塩害の場合とは異なっているために、鉄筋の自然電位は塩害の場合に比べて約 100mV 貴な値が示されることが考えられる。

(6)コンクリートの比抵抗が増加から減少に転じる時点により、腐食の開始時期を判断できると考えられる。また、腐食がさらに進展した段階を示す指標として自然電位および分極抵抗により判断できるが、判断基準については検討が必要であ

る。

5 章では、高流動コンクリートおよび普通コンクリートにおいて塩分浸透性、電気化学的な非破壊検査手法である自然電位、分極抵抗の測定値および鉄筋の腐食性状の分布に関して検討を行い、以下の結論を得た。

(1)シリカフュームおよび高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートは普通コンクリートと比べて塩分浸透量のばらつきを低減する効果があり、より一様なコンクリートが形成されていることが認められた。

(2)シリカフュームおよび高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートは塩分浸透のばらつきを抑制されていることを原因としてマクロセル的な腐食電池の生成を抑制する効果があり、普通コンクリートに比べて腐食面積率は小さな値を示していた。また、高炉スラグ微粉末はシリカフュームと比べても腐食抑制効果が大きいとの結果が得られた。

(3)腐食面積率および腐食箇所の割合で示した腐食発生確率と全塩分量の関係により、腐食発生限界量は $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあると考えられ、既往の研究結果と同様の結果が得られた。

(4)塩分浸透量、分極抵抗、および腐食面積率の3者の変動係数には相関関係が認められ、腐食があまり進行していない状態においては、塩分浸透量および分極抵抗の変動係数が大きいほど鉄筋の腐食面積率の変動係数が大きくなることが認められた。

(5)全塩分量と腐食面積率および腐食面積率とひび割れ発生確率の関係から、全塩分量の分布からかぶりコンクリート部のひび割れ発生確率を推定することが認められた。

(6)高流動コンクリートを用いることで、コンクリートの緻密性および均一性を向上させ、鉄筋腐食のばらつきを低減させる効果が認められたことから、塩害に対する維持管理が容易となり、耐久性の向上につながると考えられる。

(7)既存の構造物に対しては、非破壊検査である自然電位および分極抵抗を用いることにより、腐食箇所の特定およびその分布性状が把握でき、その結果に基づいて鉄筋のはつりだしなどの検査を行うことが可能であると考えられる。さらに、塩分浸透量および腐食量の分布を定量化することによって、分布を考慮に入れた

鉄筋の腐食について予測を行うことが可能となり、より統計的な観点に基づいた維持管理手法の提案を行うことができると考えられる。

6 章では、鉄筋コンクリート構造物の劣化予測に関して、その原因となる塩分浸透量のばらつきが鉄筋腐食に対する統計的な評価およびそれに基づいた予測について検討を行い、以下の結論を得た。

(1)塩分浸透量および鉄筋のかぶりが正規分布に従うと仮定した場合、両者の関係および腐食発生を統計的に算出を行った腐食確率と実際に腐食発生確率との間には、腐食発生限界量を 1.2kg/m^3 と設定した場合においてよい相関が見られた。腐食確率を用いて、腐食発生限界量を適切に設定することにより、塩分浸透量の分布から腐食の割合を表現することが可能であると考えられる。また、腐食確率に係数を乗じることにより鉄筋の腐食面積率の推定も可能であることが明らかとなった。

(2)分布を考慮に入れた塩分浸透による鉄筋の腐食確率に関する劣化曲線の算定を行った場合、ばらつきが大きなコンクリートの方が腐食開始時期が早期に表れ、また腐食部と非腐食部が長期間にわたり継続した。そのため、腐食部と非腐食部においてマクロセル腐食が生じ、孔食などの局所的な腐食が形成される危険性が考えられる。

(3)塩分浸透量およびコンクリートのかぶりの設計に関して、分布を考慮に入れた安全係数の算定を行うことにより、鉄筋コンクリート構造物の重要性および供用期間に応じて適切な安全率の設定を行うことが可能となり、より合理的な耐久性設計ができると考えられる。

(4)ばらつきの大きなコンクリートを用いると、鉄筋の腐食に関して局所的な劣化部が存在する可能性があるために、ばらつきが小さなコンクリートに比べてより多くの点検箇所数を確保する必要があるため、早期に補修を行う必要が生じる可能性が考えられる。

(5)高流動コンクリートを用いた場合、普通コンクリートに比べて建設コストは高くなるために供用期間が短い場合においては不経済となるが、供用期間が長い場合においては、補修間隔を小さくし、かつ点検コストを抑制することができるために維持管理コストを低くすることが可能となるという結果が得られた。高流動コンクリートを用いることによりライフサイクルコストを抑制することが可能で

ある。しかし、算出の方法によって差がみられるために実構造物に対する適用性については検討の必要がある。

各章の検討結果から、劣化予測を行うための、塩分浸透量、電気化学的モニタリング指標、および腐食面積率について、それぞれの値が一定値ではなく、ある分布をもったものであることが確認された。その原因の多くはコンクリートの材料的な不均一性、および鉄筋腐食については表面状態に起因しているとするのが適切である。本研究の結果より得られた高流動コンクリートを用いることで腐食のばらつきが低減でき、点検および点検結果による劣化予測が容易となり、維持管理に関するコストを抑制することができると考えられる。そのため、各劣化因子のばらつきを把握することは非常に重要な要素となると考えられる。

また、コンクリート中の鉄筋腐食に関して、その原因となる塩分浸透の予測手法および電気化学的モニタリングを用いた鉄筋の腐食量の推定法の確立およびその評価についても、書く劣化因子の代表値であるという点から重要な要素となると考えられる。さらに、鉄筋の腐食を抑制する手法についても検討を行う必要があると考えられる。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性におけるシナリオデザインに関しては、正確な劣化予測およびその予測値のばらつきの両者を考慮に入れて検討を行うことが不可欠であり、その結果、適切な時期に、適切な補修を実施することができ、長期間にわたり鉄筋コンクリート構造物としての性能を維持することが可能になると考えられる（図 7.1 参照）。

コンクリートは水、セメント、細骨材および粗骨材からなる複合的な材料であるので、一様な材質を有してはおらず、特に劣化因子の浸透性状が重要な要因である耐久性に関しては、従来の見解とは異なりばらつきをもった材料であるとして劣化予測を行うことが望ましいと考えられる。

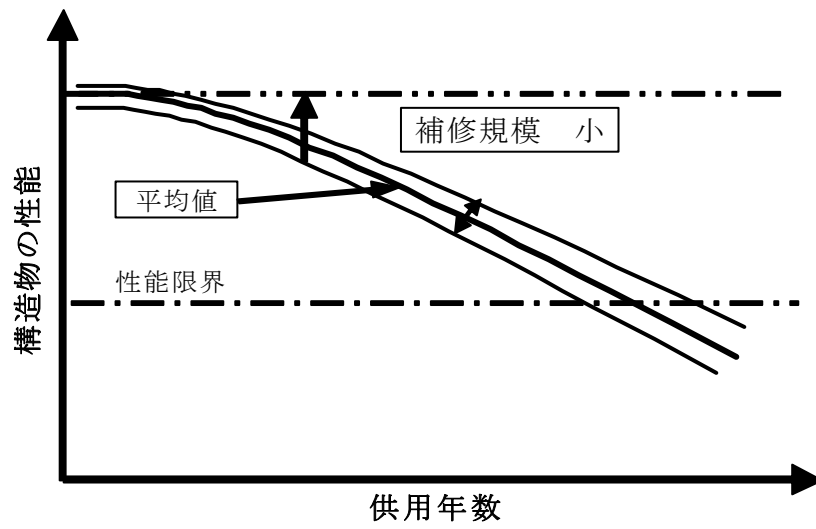
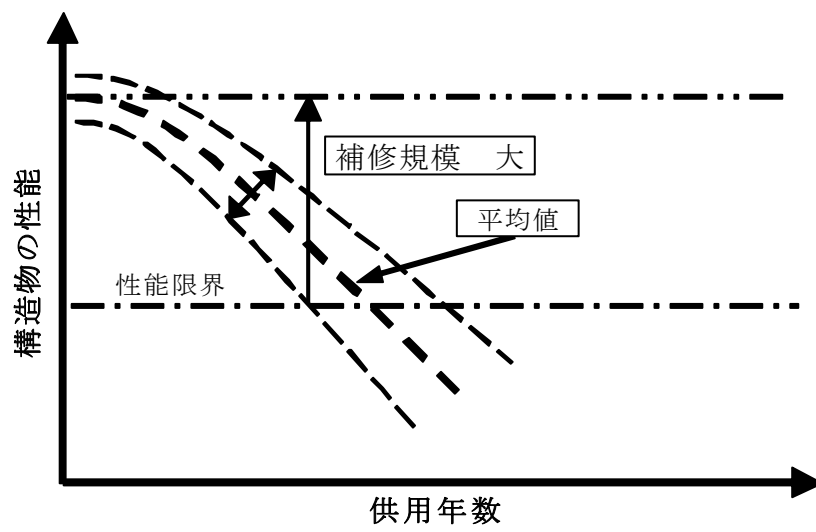


図 7.1 塩分浸透性およびそのばらつきと補修の時期および規模の関係

謝 辞

本論文は、著者が京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程入学以来、取り組んでまいりました一連の研究成果をまとめたものであります。

京都大学大学院工学研究科教授・宮川豊章先生には、本研究の遂行ならびに本論文の取りまとめにあたり、終始、熱心なご指導、ご鞭撻を賜り、また研究者としての姿勢をご教示いただきました。衷心より感謝の意を表します。また、京都大学工学研究科教授・朝倉俊弘先生、大津宏康先生には、本研究の取りまとめにあたり、貴重なご指導、ご助言を賜りました。ここに、厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科助教授・服部篤史先生には、構造材料学研究室配属以来、常に貴重なご指導、ご助言を賜りましたことを厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科助手・山本貴士先生には、構造材料学研究室配属以来、実験の遂行にあたり、常に温かいご指導を賜りましたとともに、公私にわたりお世話になりました、厚く御礼申し上げます。

本研究における実験を遂行するにあたり、盛田行彦氏および日紫喜剛啓氏をはじめとする鹿島建設（株）の皆様には格別のご支援とご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

近畿大学講師・川東龍夫先生、中部大学講師・小林孝一先生、金沢大学助手・久保善司先生、神鋼鋼線工業（株）・白濱昭二氏、東洋建設（株）・佐野清史氏、電気化学工業（株）・芦田公伸氏、大阪ガス（株）・西崎丈能氏、（株）トクヤマ・加藤弘義氏、阪急電鉄（株）・中川元宏氏、西日本旅客鉄道（株）・荒巻智氏ならびに荒木弘祐氏には、研究室を通じて温かいご支援、ご助言を賜りました。

京都大学・構造材料学研究室の学生、卒業生、関係者の皆様には、本研究の遂行にあたり、ご協力、ご支援をいただきました。特に、杉浦忠志氏、八重樫文氏、関玲子氏、野口真美氏には、卒業研究ならびに修士論文を通じて多大なるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、これまで著者を励ましてくれた両親に感謝の意を表し、本論文の謝辞と致します。